

"Estudio comparativo de distintas tecnologías fotovoltaicas"

Autor: Raúl Vega Marcos

Tutor del Trabajo: Vicente Salas Merino

Fecha: Junio 2013



INDICE

1.	Objetivo del TFG.....	4
2.	Generalidades.....	5
2.1.	INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	5
2.2.	SITUACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA	7
2.3.	FOTOVOLTAICA. NORMATIVA, REGULACIÓN Y ASPECTOS LEGALES.....	8
2.4.	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	10
2.5.	GENERADOR FOTOVOLTAICO	12
2.5.1.	TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	13
2.6.	SEGUIMIENTO SOLAR.....	19
2.7.	INVERSOR FOTOVOLTAICO.	20
2.8.	DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y PROTECCIÓN.	22
3.	Descripción de la instalación.....	24
3.1.	Ubicación y orientación de la instalación en estudio.....	24
3.2.	Características de la instalación	25
3.2.1.	Módulos fotovoltaicos	25
3.2.2.	Inversores.....	26
3.2.3.	Dispositivos de medida. Sensores.....	26
3.2.4.	Dispositivos de comunicación.....	27
4.	Resultados mediante simulación	28
4.1.	Silicio Policristalino:	29
4.2.	HIT Gen1:	30
4.3.	CdS/CdTe:	31
4.4.	Comparación aproximada entre las tecnologías.....	31
5.	Análisis de resultados	32
5.1.	Análisis de los días soleados.....	33
5.1.1.	Día soleado, 24 de Mayo de 2012:.....	33
5.1.2.	Día soleado, 16 de Junio de 2012:	37
5.1.3.	Día soleado, 14 Septiembre de 2012:	42

5.1.4.	Día soleado, 14 de Abril de 2013:	45
5.1.5.	Día Muy soleado, 24 de Julio de 2012:.....	49
5.1.6.	Resumen de días soleados:	53
5.2.	Análisis de los días nublados:	54
5.2.1.	Día nublado, 17 de Septiembre de 2012:	54
5.2.2.	Día nublado, 3 de Noviembre de 2012:	59
5.2.3.	Día Muy nublado, 17 de Enero de 2013:.....	63
5.2.4.	Día Muy nublado, 10 de Febrero de 2013:	66
5.2.5.	Día muy nublado, 3 de Abril de 2013:	70
5.2.6.	Resumen días nublados	74
6.	Presupuesto.....	75
7.	Conclusiones y recomendaciones	77
8.	Bibliografía	78
Anexo I:	Ecuaciones para el cálculo.....	79
Anexo II:	Informes PV Syst.....	82

1. Objetivo del TFG

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la comparación de diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos que se comercializan hoy en día. Se van a estudiar tres generadores formados cada uno por paneles del mismo tipo. Estos paneles forman parte de la instalación fotovoltaica con conexión a red situada en el campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid y que está realizada en colaboración con el CIEMAT o Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas.

Cada generador está conectado a un inversor que tras transformar la corriente continua en corriente alterna, la inyecta a la red conformando entre los tres generadores una corriente trifásica.

Para la comparación de las diversas tecnologías se utilizarán los datos proporcionados por los distintos sensores y dispositivos de medida de la instalación, y se analizarán datos como la producción, el Performance Ratio (indicador que sirve para observar el comportamiento de los paneles), la eficiencia o el rendimiento de cada generador. También se analizarán cómo actúan las distintas tecnologías ante cambios en la temperatura, viento o irradiancia incidente, ya que cada tecnología fotovoltaica varía de forma distinta ante estos factores.

Las tecnologías utilizadas son:

- **CdS/CdTe:** El telurio de cadmio, conocido como CdTe, es un tipo de película fina. Su principal inconveniente es que la sustancia es tóxica, pero es más barato que el silicio (el precio para el consumidor puede llegar a ser un 50% más barato). Debido al tipo de fabricación se crean paneles muy eficientes entorno al 12 %.
- **P-Si:** Las células de silicio policristalinas se caracterizan por una menor pureza en su producción que las de silicio monocristalino, y por esto tienen un coste pero también un menor rendimiento, en torno al 18% en laboratorio y 11% en producción. Este tipo de células fotovoltaicas tienen zonas de colores diferentes en lugar de un color uniforme como en las células de si-monocristalino.
- **HIT:** La tecnología HIT se forma con obleas de silicio monocristalino que están a su vez recubiertas por una delgada capa de silicio amorfo. Es la tecnología más moderna en cuanto a su producción, además proporciona el mejor rendimiento y eficiencia del sector. Se caracteriza por una eficiencia muy alta a temperaturas elevadas (al contrario que los módulos de silicio policristalino o monocristalino). Por esto producen mayor energía a la misma potencia nominal. Además tiene un menor espesor por lo que permite ahorrar silicio y para su producción precisa menos temperatura, ahorrando también energía.

2. Generalidades

2.1. INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Debido a que el consumo de energía va en aumento, surge la necesidad de nuevos métodos de obtenerla, ya que los métodos tradicionales como el petróleo, el carbón o el gas tienen efectos perjudiciales en el medio ambiente al emitir CO_2 a la atmósfera (causa principal del llamado *efecto invernadero*) y además su cantidad está limitada. Por esto surgen las llamadas energías renovables, dentro de las cuales destacan la energía solar fotovoltaica, hidráulica y la energía eólica. El principal problema de estas energías renovables es su falta de continuidad si bien las energías renovables son limpias e inagotables, también es cierto que se encuentran supeditadas a las condiciones ambientales, lo que no pasa en el caso de las no renovables, que nos permiten aumentar o disminuir la producción según necesitemos.

Estas condiciones implican que, de momento, necesitemos seguir empleando energías contaminantes, y en algunos casos incluso peligrosas, para cumplir nuestra demanda. Si sólo empleásemos energías renovables, la producción sería distinta para cada día, y dependiente de las condiciones atmosféricas y ambientales en general, lo que haría imposible ajustarnos a la demanda prevista y cumplir un buen servicio. Aún así, las renovables ganan cada día más terreno en todo el mundo, y especialmente en España, un país cuya posición geográfica dota con excelentes condiciones para explotar energías como la eólica o la solar con gran éxito.

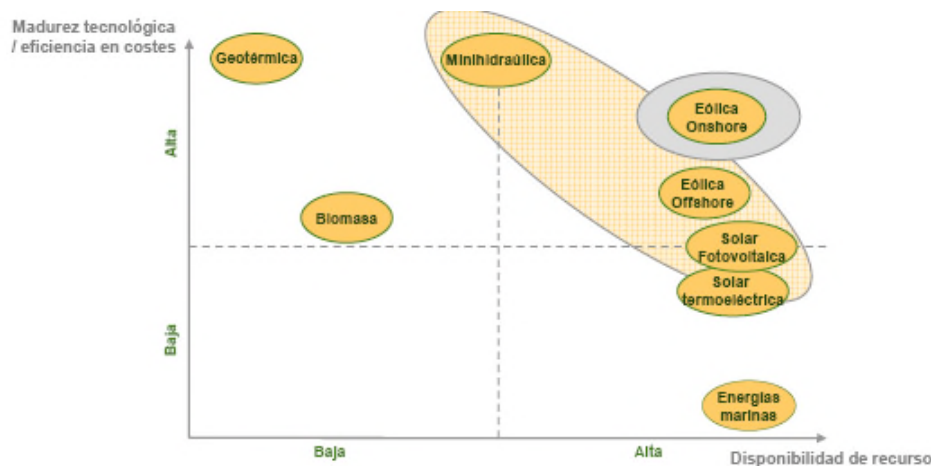


Fig. 2.1. Disponibilidad y madurez de las diferentes formas de generación. Fuente: Asignatura "Generación eólica y fotovoltaica".

Algo que caracteriza a la energía eléctrica es la imposibilidad de su almacenamiento a gran escala (salvo en casos aislados como baterías) por que debe ser consumida según se genera, de modo que la previsión de la demanda eléctrica es un aspecto muy importante para poder suministrar la energía necesaria en cada momento, sin interrupciones. En la siguiente gráfica vemos la demanda de energía eléctrica para un día laborable:

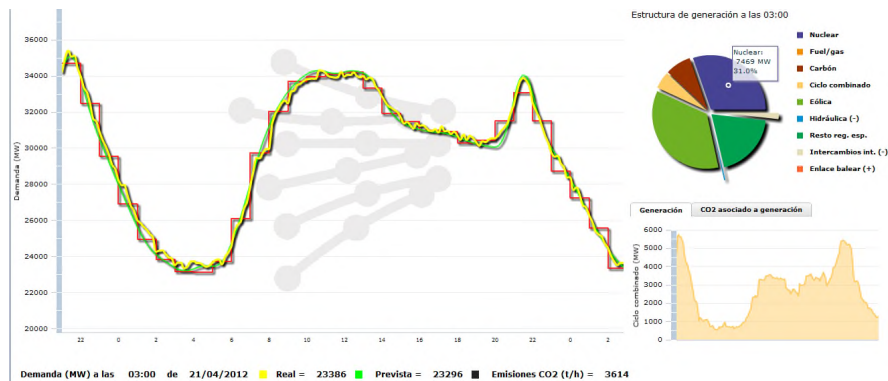


Fig. 2.2. Demanda de energía eléctrica en tiempo real para todo el territorio español. Fuente: REE.

Como vemos en la imagen la energía generada en un día proviene de diferentes formas de generación. Se suele hablar de dos grandes grupos, las energías renovables y las no renovables según la forma de producir la energía eléctrica.

Esto es un problema a la hora de ajustar la generación a la demanda, pues no sólo hemos de producir la energía necesaria, sino que además, hemos de variar el porcentaje sobre el total que genera cada tipo de energía para compensar unos con otros. En la siguiente gráfica se observa cómo varían dichos porcentajes de energía eléctrica producida en dos momentos del mismo día, respecto a la imagen anterior:

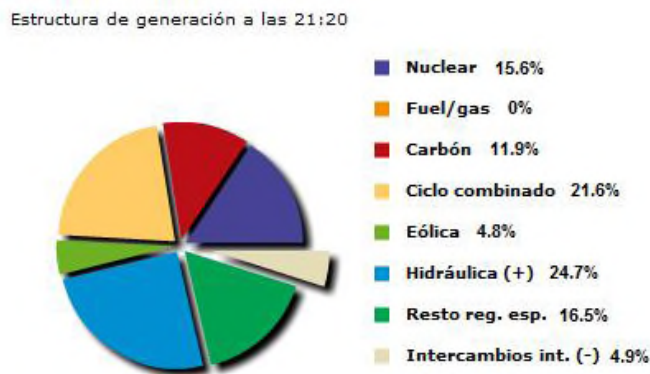


Fig. 2.3. Porcentajes de demanda de energía eléctrica en España a las 21:00 horas. Fuente: REE.

Dentro de este proyecto vamos a centrarnos en la energía solar que es aquella energía obtenida directamente del Sol aprovechando la radiación solar incidente en la Tierra tanto por su capacidad para calentar como por su capacidad de producir energía eléctrica en diversos dispositivos adaptados para este fin.

La radiación solar puede proporcionar valores de potencia variables en función del momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud.

Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente 1000 W/m² en la superficie terrestre. A esta potencia se la conoce como irradiancia, que es un término que utilizaremos muy a menudo en este proyecto para ver la calidad de diversas tecnologías de paneles fotovoltaicos.

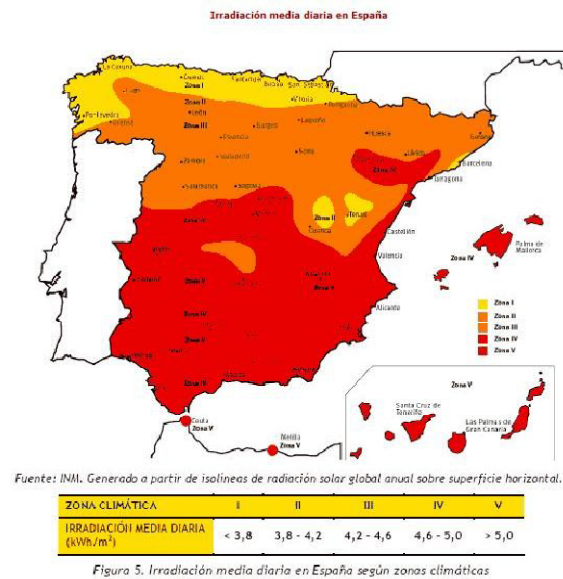


Fig. 2.4. Niveles de irradiancia en España. Fuente: INM

Hay diversos tipos de radiación que pueden ser aprovechables como la radiación directa y la radiación difusa, o la suma de ambas. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones.

2.2. SITUACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA

La energía solar fotovoltaica tiene un gran futuro en nuestro país, es el tercer país con más potencia fotovoltaica instalada. Hay muchos usos para la energía fotovoltaica como es el respaldo en caso de fallo de la red eléctrica (Hospitales, iluminación de emergencia...), la iluminación de carreteras, redes de control y toma automática de datos, bombeo de agua, electrificación rural, etc.

En España las principales instalaciones que se suelen hacer de superficies fotovoltaicas son las instaladas en tejados y fachadas.

La situación de España en cuanto a investigación de la generación de la energía fotovoltaica, hace que seamos uno de los principales países productores de paneles y células fotovoltaicas. Según la IDAE, España es un país para implantar y desarrollar energía solar fotovoltaica, pero aún no ha dado su punto máximo.

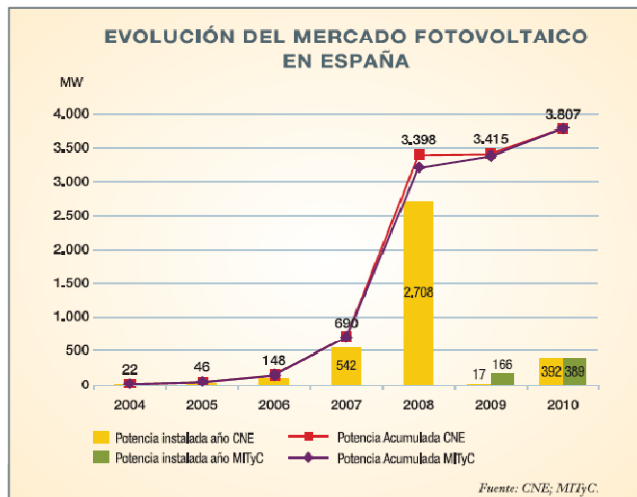


Fig. 2.5. Desarrollo del mercado fotovoltaico español. Fuente CNE, MITyC

La industria fotovoltaica en España produjo en 2010 un total de 100 MW de células de silicio cristalino y 699 MW de módulos, la mayor parte de tipo silicio cristalino (el 91% del total). Además, se produjeron más de 1.300 MW de inversores fotovoltaicos y la potencia fabricada de seguidores alcanzó los 166 MW

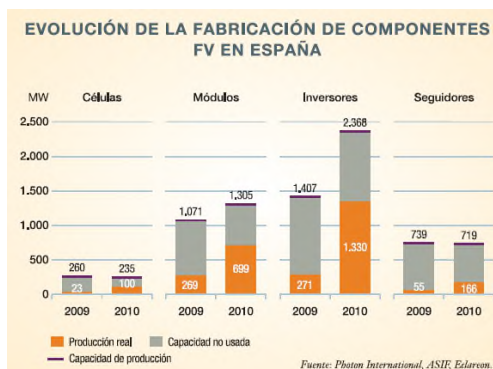


Fig. 2.6. Evolución de la fabricación de componentes de FV en España. Fuente: Photon internacional, ASIF, Edareon

2.3. FOTOVOLTAICA. NORMATIVA, REGULACIÓN Y ASPECTOS LEGALES

Todas las energías de régimen especial tienen este nombre porque se regulan de forma diferente a las otras, en especial la fotovoltaica que desde hace ya varios años tiene un regulación legal concreta. En el caso de una instalación fotovoltaica con conexión a red como la de nuestro proyecto, existen una serie de decretos y leyes que hay que cumplir para respetar la normativa, tanto en el caso de un usuario independiente como de una empresa.

Las leyes y decretos para el régimen especial se renuevan constantemente, ya que el mercado varía de forma muy rápida, a continuación se mostrarán una serie de leyes para el sector fotovoltaico.

Normativa:

1. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico.
2. Real Decreto 2019/1997, de 26 de diciembre, por el que se organiza y regula el mercado de producción de energía eléctrica.
3. Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
4. Real Decreto 1663/2000, de 29 de septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión.
5. Resolución de 31 de mayo de 2001, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se establecen modelos de contrato tipo y modelo de factura para instalaciones solares fotovoltaicas conectadas a la red de baja tensión.
6. Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento de Baja Tensión. Incluye el suplemento aparte con el Reglamento electrotécnico para baja tensión y sus instrucciones técnicas complementarias (ITC) BT 01 a BT 51.
7. Instrucción de 21 de enero de 2004, de la Dirección General de Industria, Energía y Minas, sobre el procedimiento de puesta en servicio de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red.
8. Real Decreto 2351/2004, de 23 de diciembre, por el que se modifica el procedimiento de resolución de restricciones técnicas y otras normas reglamentarias del mercado eléctrico.
9. Real Decreto 1454/2005, de 2 de diciembre, por el que se modifican determinadas disposiciones relativas al sector eléctrico.
10. Real Decreto-Ley 7/2006, de 23 de junio, por el que se adoptan medidas urgentes en el sector energético.
11. Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
12. RESOLUCIÓN de 27 de septiembre de 2007, de la Secretaría General de Energía, por la que se establece el plazo de mantenimiento de la tarifa regulada para la tecnología fotovoltaica, en virtud de lo establecido en el artículo 22 del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo.
13. Orden ITC/3860/2007, de 28 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de enero de 2008.
15. Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica para instalaciones posteriores a la fecha límite de mantenimiento de la retribución del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para dicha tecnología.
16. Real Decreto 1565/2010, de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
17. Pliego de Condiciones Técnicas de instalaciones de Energía solar fotovoltaica Conectadas a red del I.D.A.E.

Seguidamente vamos a mostrar un extracto de prensa en el que se describe lo expuesto en el BOE del 31 de diciembre de 2012, y en el que se regulan las tarifas de remuneración por kWh producido según actividad y ubicación para la FV conectada a red:

Publicada la Orden **IET/3586/2011**, de 30 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2013 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial.

La actualización para el precio del kWh para instalaciones inscritas en el Real Decreto 661/2007 es el siguiente:

- Menores de 100kW. Tarifa regulada = 48,8743 c€/kWh
- Entre 100kW y 10 MW. . Tarifa regulada = 46,3348 c€/kWh
- Entre 10MW y 50 MW. . Tarifa regulada = 25,4997 c€/kWh

2.4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Existen diversos sistemas fotovoltaicos, que se caracterizan por el beneficiario de la generación de la energía eléctrica. Los principales sistemas son los sistemas aislados, los conectados a red y los sistemas híbridos

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS

Los sistemas fotovoltaicos aislados son aquellos que precisan de sistemas de acumulación de la energía producida. Esta acumulación de la energía es necesaria ya que el sistema fotovoltaico solo puede producir energía durante las horas de sol, y así durante la tarde y noche cubre la demanda con la energía acumulada. Para tener este tipo de configuración, el campo fotovoltaico debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de sol, la alimentación de la carga y de la recarga de las baterías de acumulación.

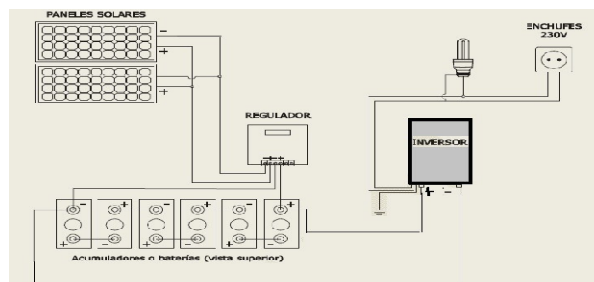


Fig. 2.7. Esquema de un sistema aislado.

Los sistemas fotovoltaicos aislados están formados por los siguientes equipos principales: regulador de carga, módulos fotovoltaicos, inversor y sistema de acumulación formado por baterías de acumulación. Por lo tanto la energía producida por los módulos fotovoltaicos es almacenada en baterías de acumulación, y la carga se alimenta a través del regulador de carga. Los elementos característicos de un sistema aislado son:

- Inversor: Es el encargado de proporcionar la corriente alterna necesaria para una red, a través de la batería de acumulación que almacena la energía generada por los paneles fotovoltaicos.
- Regulador: Es el encargado de evitar sobrecargas y descargas profundas de la batería que pudieran producir en ella daños irreversibles, impide que en los períodos sin luz, las baterías se descarguen a través de los paneles e intentar que el sistema trabaje en su punto de máxima potencia, aunque es opcional ya que esta función puede hacerla el inversor

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED

Los SFCR o Sistemas Fotovoltaicos conectados a la red, son los sistemas que han presentado un mayor crecimiento en los últimos años dentro de las aplicaciones de la energía. Tiene una configuración definida como se muestra en la siguiente imagen y destacan por que proporcionan toda o parte de su producción a la red de distribución.

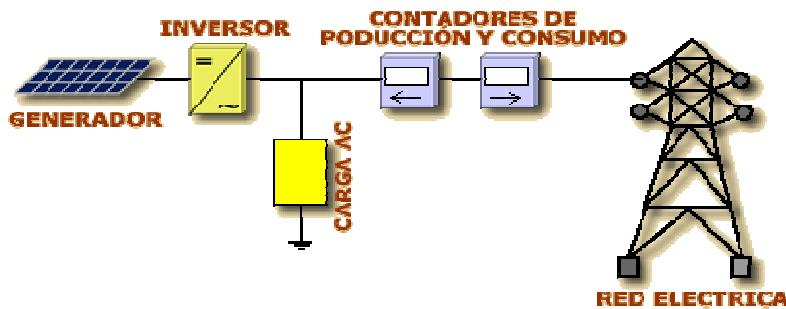


Fig. 2.8. Esquema de los sistemas de conexión a red

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red están constituidos por:

- Generador fotovoltaico, formado por los módulos interconectados eléctricamente y por la estructura de soporte.
- El sistema de control y la interfaz con la red eléctrica que se constituye por el conjunto de medidas adoptadas para garantizar la calidad de servicio donde encuadraríamos el contador de energía que mide la energía producida por el sistema fotovoltaico durante su periodo de funcionamiento.
- Convertidor de corriente continua-alterna o inversor, es uno de los componentes principales porque maximiza la producción de corriente del dispositivo fotovoltaico y optimiza el paso de energía entre el módulo y la carga. Es un dispositivo que transforma la energía continua producida por los módulos (12V, 24V, 48V) en energía alterna, habitualmente a 220V, para alimentar el sistema y/o introducirla en la red, con la que trabaja en régimen de intercambio. Los inversores para la conexión a la red eléctrica están equipados generalmente con un dispositivo electrónico que permite extraer la máxima potencia, paso por paso, del generador fotovoltaico. Este dispositivo sigue el punto de máxima potencia (MPPT) y tiene justamente la función de adaptar las características de producción del campo fotovoltaico a las exigencias de la carga

Se distinguen dos tipos de sistemas, que corresponden a motivaciones y objetivos diferentes:

- Centrales fotovoltaicas: Se busca optimizar la producción energética mediante un enfoque centralizado, similar al empleado en centrales eléctricas convencionales. Se localizan en terrenos alejados de núcleos urbanos y debidamente acondicionados para albergar las estructuras de soporte de los módulos fotovoltaicos y otras infraestructuras. Emplean generadores fotovoltaicos de potencia nominal comprendida entre varios cientos de Kwp y 10 Mwp, que operan con estrategias de captación solar estáticas o móviles, y ponen la totalidad de su producción en redes eléctricas de media tensión.

- Sistemas fotovoltaicos integrados en edificios: son aquellos generadores fotovoltaicos, de potencia nominal entre uno y varios cientos de Kwp, que se integran en edificios y otras construcciones urbanas. Podemos observar que en algunos casos se suministra parte del consumo del edificio y se vierte el excedente en la red de distribución mientras que en otros casos se inyecta toda la producción a la red de distribución.

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS

Los sistemas fotovoltaicos híbridos se caracterizan por utilizar la energía de los paneles solares fotovoltaicos combinada con otra fuente de energía, como la eólica, la de generadores diesel, pequeñas centrales mini hidráulicas, o cualquier otra fuente de energía, de forma que cubren parte de la demanda mediante el aprovechamiento del conjunto de los recursos renovables de una zona. Mediante el correcto diseño de un sistema híbrido, es posible conseguir que la instalación suministre en todo instante la potencia eléctrica demandada. La principal dificultad que entrañan los sistemas es este diseño correcto, debido a que es muy complicado por la variabilidad de la energía solar y de la demanda de la carga, así como las características no lineales de algunos componentes.

Por ejemplo, cuando los consumos son elevados en una instalación aislada, se utilizan de forma puntual los sistemas PV-diesel que combinan energía solar fotovoltaica y un generador diesel, siendo el generador diesel el encargado de suministrar esos valores elevados de potencia eléctrica, ya que si solo dispusiésemos de paneles fotovoltaicos el sistema debería disponer de un número de paneles y baterías excesivamente elevado.

2.5. GENERADOR FOTOVOLTAICO

El generador fotovoltaico es el elemento encargado de producir la energía eléctrica mediante la energía incidente que recibe del Sol. Se compone de paneles o módulos que se pueden conectar entre ellos en serie o en paralelo.

La electricidad es generada en la célula fotovoltaica debido a la incidencia de la luz solar, donde parte de esa energía (fotones) es absorbida, generándose partículas con cargas positivas y negativas (huecos y electrones), las cuales se mueven libremente en todas direcciones. Los electrones o carga negativa tienden a lo que se conoce como unión semiconductora N y los huecos a las llamadas uniones semiconductoras P.

Estos módulos o paneles se componen a su vez de células fotovoltaicas. Las células se agrupan en lo que se denomina el módulo solar o fotovoltaico. Este conjunto de células deben estar convenientemente conectadas, de tal forma que reúnan las condiciones óptimas para su integración en sistemas de generación de energía, siendo compatibles con las necesidades y los equipos estándares existentes en el mercado.

Los paneles o módulos fotovoltaicos se conectan en serie o en paralelo:

- Módulos con conexión en serie: En este caso se conectan diferentes placas uniando el polo de la primera con el contrario de la segunda. El resultado es una tensión total del sistema igual a la tensión de una placa multiplicada por el número de placas conectadas, siendo la intensidad del sistema igual a la de una única placa.
- Módulos con conexión en paralelo: Las placas con conexión en paralelo se conectan uniando todos los polos positivos por un lado y los negativos por el otro, dando como resultado una tensión total del sistema igual a la de una única placa. Por otro lado la intensidad total es la intensidad de una placa multiplicada por el número de placas fotovoltaicas en paralelo.

La tensión de una única célula fotovoltaica está en torno a los 0,6 V, por lo que es necesario conectar en serie entre 30 y 36 células para obtener tensiones del orden de 20 V_{c.c.}

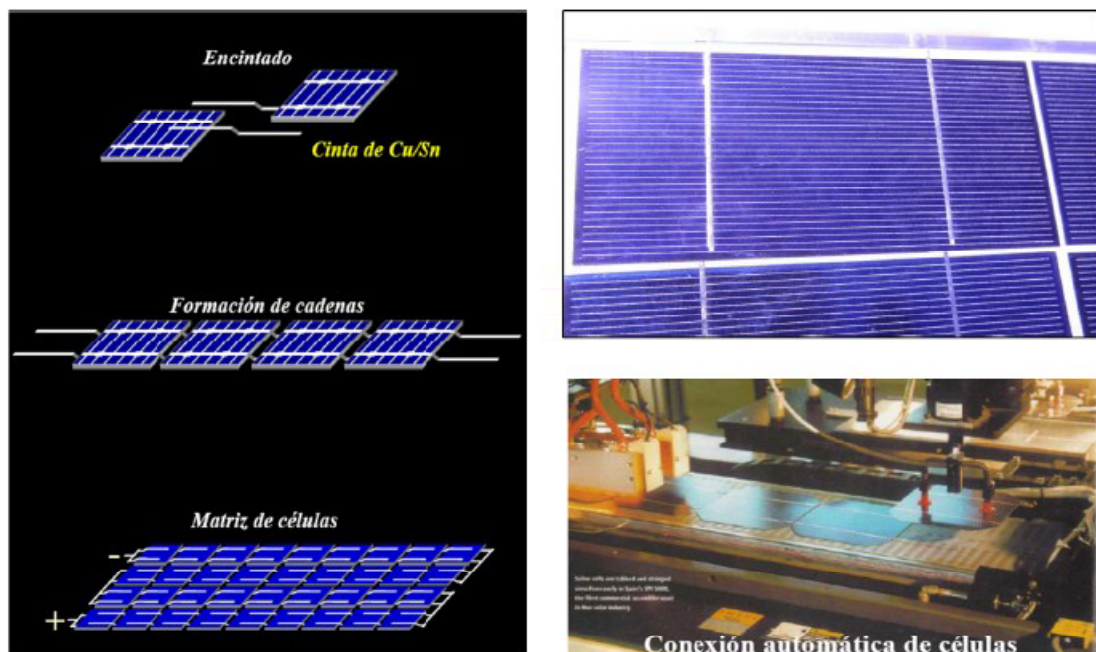


Fig. 2.9. Matriz de células interconectadas. Fuente: SunPower

2.5.1. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Dentro de los tipos de células solares podemos distinguir dos grandes grupos:

- Células "convencionales", por ser las más utilizadas dentro del mercado de la energía fotovoltaica. Estas tecnologías parten del Silicio y sus tipos son: tipo monocristalino, tipo policristalino y tipo silicio amorfo.
- Otro tipo de células menos convencionales dentro de las cuales destacan: "Silicio amorfo Tandem", "CdTe", "EFG", "RIBBON", "CIS", "HIT" y " μ -Si/a-Si".

SILICIO MONOCRISTALINO

Están fabricadas de silicio, que es el material más abundante en la corteza terrestre. Este tipo de panel es el que más se utiliza actualmente en la fabricación de células solares. Es un tipo de célula muy difícil de elaborar y se pretende sustituir para suprimir costes.

El proceso de fabricación sigue la siguiente secuencia: en primer lugar se purifica el silicio, luego se funde y se cristaliza en lingotes redondos, mas tarde cuando sea redondeado, se corta en finas obleas, para conseguir células individuales cortando los extremos redondeados para aprovechar la superficie.

La técnica más utilizada para fabricar el silicio monocristalino es el método Czochralski o método CZ, en el que una semilla de silicio monocristalino toca la superficie del silicio fundido contenido en un crisol. Conforme la semilla del cristal se va extrayendo muy lentamente, el silicio fundido se solidifica y sus átomos siguen la estructura de la semilla y, por tanto, van extendiendo la estructura monocristalina.

Las células tienen un color uniforme, generalmente azul o negro y se consigue un rendimiento del 19,1% en laboratorio y entre un 10 % y un 13% en producción.



Fig. 2.10. Célula de Silicio Monocristalino. Fuente: Powersol

SILICIO POLICRISTALINO

Este tipo células se caracterizan por estar fabricadas con un silicio menos puro, siendo así más baratas que las células monocristalinas, lo que repercute en un rendimiento más bajo que la de la tecnología monocristalina, aunque los fabricantes de este tipo de células fotovoltaicas aseguran que las ventajas por abaratar costes compensan las pérdidas de eficacia.

A pesar de la reducción de costes de la célula policristalina, ha que destacar el menor rendimiento del módulo y la mayor tasa de rechazo en la fabricación de la célula (10% frente al 5% en monocristalino).

La diferencia entre la superficie de las células monocristalinas y policristalinas se basa en que las policristalinas tienen zonas de colores diferentes, en vez del color uniforme de las células monocristalinas. Las células policristalinas consiguen un rendimiento del 18% en laboratorio y entre un 10 y un 12% en producción.



Fig. 2.11. Célula de Silicio Policristalino. Fuente: SitioSolar

SILICIO AMORFO

Este tipo de tecnología se caracteriza por no tener ninguna estructura cristalina a diferencia de los anteriores, por lo que el silicio amorfo se forma por varias capas de Silicio depositadas al vacío sobre un cristal, plástico o metal.

Lo habitual es que se forme una célula continua ocupando todo el módulo, ya que se pueden fabricar de diversos tamaños. Este tipo de tecnología plantea el problema de una clara disminución de su eficiencia cuando han sido expuestos a una larga y prolongada irradiación solar. También se ha demostrado que en las 100 primeras horas de funcionamiento se produce una degradación hasta que se estabiliza y la producción de corriente es prácticamente estable después. Aunque hay que destacar que es una tecnología muy estable con un buen comportamiento ante agentes externos como la lluvia la humedad, la temperatura o la corrosión.



Fig. 2.12. Célula de Silicio Amorfo. Fuente: Sfe-Solar

SILICIO AMORFO TIPO TÁNDEM

Los módulos tipo tándem están formados por una capa fotovoltaica de silicio amorfo y una capa fotovoltaica de silicio cristalino en la parte superior combinando así dos tipos de materiales semiconductores distintos. Este módulo tipo tándem puede absorber una variedad muy amplia de longitudes de onda de luz solar, de ultravioleta a infrarrojo, obteniéndose una muy alta eficiencia de conversión. Debido a que cada tipo de material aprovecha sólo una parte del espectro electromagnético de la radiación solar, mediante la combinación de dos o tres tipos de materiales, es posible aprovechar una mayor parte del mismo. La célula con material semiconductor 1, solo aprovecha una parte del espectro electromagnético de que está compuesta la luz solar. La célula con el material semiconductor 2 aprovecha otra parte del espectro electromagnético de la luz, combinando ambos materiales se aprovecha una mayor parte del espectro electromagnético. El rendimiento total será en teoría la suma de los rendimientos de ambos tipos de células por separado.

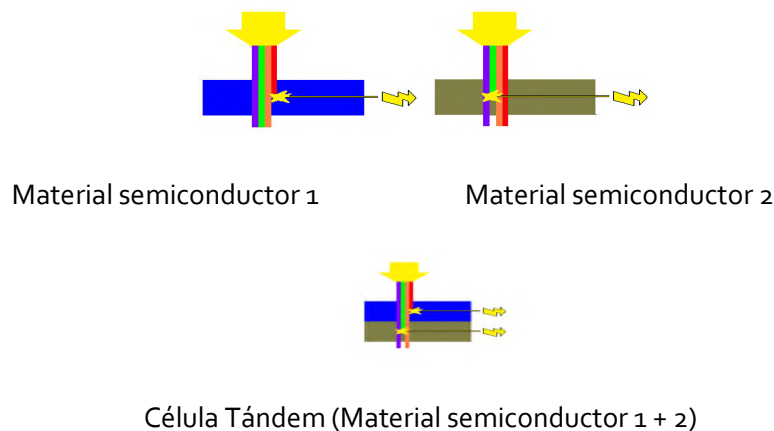


Fig. 2.13. Célula Tándem. Fuente: SitioSolar

Cadmio Teluro

El **telurio de cadmio**, conocido como CdTe, es otra clase de película fina. Tiene cualidades útiles, pero tiene un problema, que la sustancia es tóxica. El CdTe es también menos eficiente que el silicio, aunque es más barato.

En la fabricación de este tipo de células se utiliza vidrio recubierto con una delgada película de un compuesto cristalino de cadmio - telurio en vez del típico y costoso silicio, necesitando 100 veces menos material semiconductor.

Debido a que este proceso crea paneles altamente eficaces (de 11 a 13%), y de una forma rápida, puede hacerse todo de una forma mucho más barata, con tecnologías existentes. El costo para el consumidor se podría reducir en un 50%.

Y algo también interesante es que esta nueva tecnología en paneles solares, no necesita ser conectada a la red eléctrica, por lo que puede utilizarse en cualquier región por más alejada e inhóspita que sea.

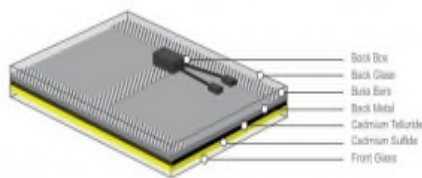


Fig. 2.14. Célula de Cadmio Teluro. Fuente: Technosun

EFG

Las obleas solares son elementos básicos de las células EFG que se fabrican por el proceso EFG (Edge defined Film-fed Growth) patentado en todo el mundo por SCHOTT Solar.

A diferencia de la fabricación tradicional por corte de un bloque de silicio, en el proceso EFG se obtiene el producto estirado directamente del punto de fusión en forma de tubo octogonal de silicio.

El perfil octogonal de silicio de 6 m de longitud tiene un grosor de pared de 330 μm , que ya es el grosor definitivo de las células. Luego, se cortan las obleas de 100mm² y 125mm² con un láser.

Las empresas productoras de módulos de todo el mundo vienen utilizando células EFG desde 1981 para aplicaciones que van desde unos pocos Wp hasta grandes módulos de 300 Wp para las condiciones climáticas más severas.

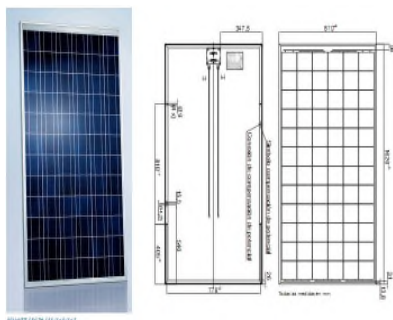


Fig. 2.15. Célula EFG. Fuente: SCHOTT Solar

STRING RIBBON

En la técnica de String-Ribbon, dos cadenas de alta temperatura se extraen verticalmente a través de un somero silicio, se derriten, y el silicio fundido se extiende entre las dos cuerdas a través de la tensión superficial y se congela entre ellas.

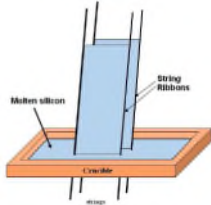


Fig. 2.16. Esquema de la célula de String-Ribbon.

Ventajas

- Casi logra la eficacia de las células de oblea de silicio
- Elimina el gasto de silicio del proceso de serrado.

Inconvenientes

- Las obleas de cuerda no son tan planas como las obleas convencionales cortadas de silicio policristalino y esto puede afectar a la producción.
- Todavía es un proceso manual (aunque un sistema automatizado está desarrollo).
- Tiene una penalización de eficacia.
- String Ribbon requiere alrededor del 35 % menos de silicio policristalino que las células convencionales solares pero este necesita la especialidad de el silicio policristalino granular.

Históricamente, el tipo String Ribbon ha quedado un poco alejado de la eficiencia de otras células de silicio, pero la diferencia se está acortando. Ahora ya se fabrican células con eficiencias en torno al 15%.

DISELENIURO DE COBRE (CIS)

Este tipo de célula fotovoltaica, está basado en el Diseleniuro de Cobre de Indio (CIS) y se prevé que en un futuro, debido a su competitiva relación entre producción de energía/costo pueda llegar a sustituir a los combustibles fósiles en la producción de energía. Los módulos CIS se caracterizan por absorber un espectro ancho de energía y garantizan máxima energía bajo condiciones desfavorables.

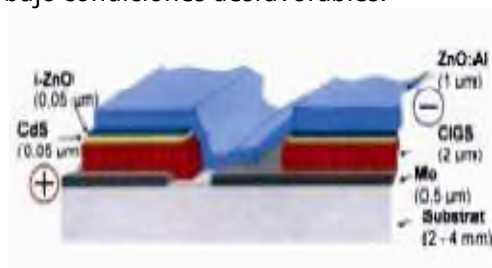


Fig. 2.17. Esquema de la célula CIS.

HIT

El panel solar tipo **HIT**, es una tecnología híbrida que se caracteriza por estar formado por obleas de silicio monocristalino recubiertas por una capa muy delgada de silicio amorfo. Esta célula es producida con las técnicas de producción más modernas y proporciona el rendimiento más elevado del sector.

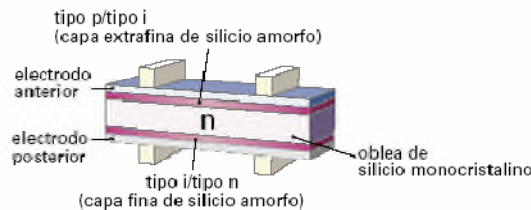


Fig. 2.18. Esquema de la célula HIT.

Ventajas

Beneficios en términos de rendimiento

- Alta eficiencia de la célula y del módulo. La célula HIT y el módulo tienen el nivel más alto del mundo en eficiencia.
- Alto rendimiento a altas temperaturas
- Incluso a altas temperaturas, la célula solar HIT puede mantener una eficiencia más alta que una célula solar cristalina convencional.

Beneficios para el medioambiente

- Baja necesidad de energía para la producción: la célula solar HIT requiere sólo 200°C para el proceso de formación de los enlaces (una célula solar cristalina: cerca de 900°C). Esto ayuda a ahorrar energía.
- Diseño plano: la célula solar HIT tiene alrededor de 200 µm de espesor (una célula solar convencional alrededor de 350 µm). Esto ayuda a ahorrar silicio.

Aplicaciones

- Cubiertas de casas residenciales
- Sistemas aislados de alto voltaje
- Grandes sistemas de conexión a red
- Sistemas de bombeo de agua

Beneficios en calidad

Las células HIT y los módulos están sujetos a estrictas inspecciones y medidas para asegurar el cumplimiento de criterios eléctricos, mecánicos y visuales.

μ -Si/a-Si

Este tipo de célula es de silicio depositado en forma de láminas delgadas de silicio amorfo. La investigación en láminas de silicio depositado ha permitido desarrollar silicio amorfo intrínseco de calidad de dispositivo depositado a alto ritmo de crecimiento. Se desarrolla el material en dos fases "una microcristalina y otra amorfa" llamado silicio híbrido. Este material, preparado a partir de silano muy diluido en helio, no presenta capa de incubación amorfa, y por lo tanto, se deposita con su microestructura característica incluso en forma de láminas extremadamente delgadas (del orden de 10 nm) como las necesarias para la formación de emisores dopados en células solares con otros tipos de dispositivos optoelectrónicos, basados en el silicio depositado.

2.6. SEGUIMIENTO SOLAR.

Hemos visto que la orientación de los paneles tiene un papel muy importante en el comportamiento de una instalación, tanto como la irradiancia. Con un correcto diseño de la instalación podremos aprovechar mejor la radiación solar, teniendo así una mayor potencia generada. Para ellos se desarrollaron los sistemas de seguimiento, con los que se consigue un incremento considerable de la producción, ya que la luz solar es más aprovechada al incidir sobre el panel durante más horas al día y hacerlo de forma más perpendicular a la superficie fotovoltaica. Se distinguen dos tipos de seguimiento, el azimutal y el de inclinación, y a su vez el seguimiento puede ser de uno o dos ejes.

En las instalaciones fijas, los paneles generadores poseen una orientación concreta para aprovechar la radiación de forma óptima, pero una vez instalados se mantienen estáticos por lo que se no se mueven nunca. Lo mejor es orientarlos hacia el sur, para aprovechar totalmente las horas de sol, ya que el movimiento solar se produce de este a oeste. Se deben colocar inclinados, con un ángulo óptimo de inclinación que suele coincidir con la latitud donde se encuentra la instalación, aunque en estos casos hemos de tener en cuenta que la luz solar no incide con el mismo ángulo durante todo el año, por lo que se suele optar por colocar los paneles con un ángulo ligeramente distinto a la latitud para mejorar la generación en los meses de invierno, aun a costa de perjudicar ligeramente la producción en verano.

- El seguimiento azimutal consiste en el giro del generador sobre un eje vertical para mantenerlo orientado hacia el Sol, pero manteniendo constante su inclinación. Se calcula un incremento de entre un 15% y un 25% en la producción respecto a instalaciones fijas.
- El seguimiento de inclinación consiste en un giro sobre el eje horizontal, de modo que el ángulo que presenta el generador varía a lo largo del día, sin embargo el panel no gira. Supone un incremento de otro 15% respecto a las instalaciones fijas.
- El seguimiento a dos ejes es una combinación de los anteriores, donde conseguimos que la luz incida de forma perpendicular al panel durante todas las horas de sol del día. Es, lógicamente, el sistema más caro y complicado de controlar, pero produce un incremento típico del 40-50% en la productividad respecto a una instalación fija, llegando incluso al 70% en casos concretos.

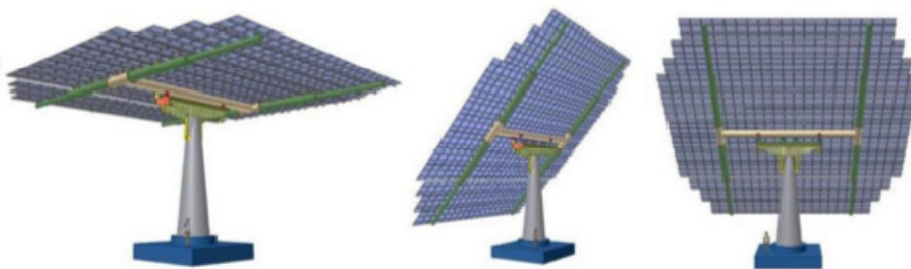


Fig. 2.19. Movimientos de un generador con seguimiento a dos ejes.

Este tipo de seguimiento solar solo se utiliza en aquellos casos que sea rentable, como es el caso de las huertas solares, cuya finalidad es obtener el máximo de potencia posible. En estas ubicaciones el espacio no supone un problema, y aquí poner seguidores a dos ejes puede significar un aumento espectacular de la producción, pues fácilmente se puede llegar a duplicar la energía que produciría una instalación similar sin seguimiento. Sin embargo en el caso de instalaciones sobre cubierta, no se puede hacer, ya que no se dispone de tanto espacio y el peso de la instalación sería excesivo, poniendo en riesgo la estructura del tejado. Al final todo se reduce a un estudio comparativo para saber qué es lo más conveniente en cada caso, que acompañado de una buena simulación permite tomar la elección correcta.



Fig. 2.20. Detalle de un seguidor solar a doble eje.

En la fotografía se puede ver el aspecto de un seguidor fotovoltaico de doble eje. El sistema consta de una estructura móvil y un motor encargado de desplazar el conjunto para mantenerlo orientado permanentemente. Como vemos, el tamaño de la estructura es considerable, lo que añade un peso al conjunto que a veces no es aceptable según la ubicación de la instalación.

En la actualidad se encuentran más extendidas las instalaciones fijas que las dotadas de seguimiento solar, ya que la mayoría son sobre tejado o cubierta, y como se ha mencionado anteriormente, estas ubicaciones no admiten cargas tan pesadas en la instalación y por lo general suelen ser fijas. Sólo en algunas instalaciones sobre suelo y de gran potencia es rentable incorporar el seguimiento uno o dos ejes. Este es el caso de las huertas solares, que suelen ser grandes (orden de cientos de kWp o incluso MWp) y donde no existen problemas de extensión, peso de los generadores o sombras entre los mismos debidas a su movimiento.

2.7. INVERSOR FOTOVOLTAICO.

Se conoce como inversor fotovoltaico al dispositivo que transforma la corriente continua producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna de tensión constante. Es un elemento fundamental en la instalación, ya que normaliza la energía producida por los generadores para permitir su inyección a la red o su conexión con baterías en sistemas aislados.

Los inversores son dispositivos electrónicos de potencia que presentan múltiples posibilidades y configuraciones: medio puente, puente completo, push-pull, modulados o sin modular... las combinaciones son variadas. Para las instalaciones fotovoltaicas se elige el tipo más adecuado de inversor en cada caso.

La potencia se dimensiona en función de la producción estimada por los generadores, de modo que la tensión de entrada no sobrepase el límite admisible por el inversor, en cuyo caso se debe cambiar de componente o establecer otra configuración.

De esta forma el inversor es en realidad el que marca la tensión máxima admisible de la instalación. Ya que se conectan varios paneles en serie hasta que se alcanza la tensión máxima admisible por el inversor. Si la potencia ofrecida por el generador es inferior a la que admite el inversor, se puede colocar otra serie igual de paneles en paralelo con la anterior para aumentar la corriente, y con ello la potencia generada. La cuestión es adaptar el generador al inversor o viceversa, consiguiendo emparejar lo máximo posible sus propiedades. Sería absurdo tener un generador de 1 kW conectado a un inversor de 5 kW, pues estaríamos infrautilizando un dispositivo por el que pagamos un precio mayor, y sería peligroso conectar un generador de 5 kW a un inversor de 1 kW, pues éste último casi con toda seguridad se destruiría al entrar en funcionamiento con una potencia muy superior a la nominal de diseño.



Fig. 2.21. Inversor SMA (como el empleado en la instalación de este proyecto). Fuente: SMA

Existen inversores monofásicos y trifásicos, siendo ambos tipos perfectamente válidos para la función a desempeñar en una instalación fotovoltaica, y quedando una vez más a elección del usuario el modelo a elegir según le convenga. Los inversores suelen llevar incorporado un seguidor del punto de máxima potencia, o MPP por sus siglas en inglés (*Maximum Power Point*). Esto es beneficioso, pues el inversor opera siempre en ese punto de potencia máxima, lo que implica el mejor rendimiento posible incluso en condiciones ambientales cambiantes, y permite generar más energía. Otras características que resultan determinantes a la hora de elegir un inversor es la capacidad de desconexión automática y rearme posterior en caso de fallo, pues es preferible una pérdida de la energía generada desde que se produce el fallo hasta su posterior reparación que un posible daño irreversible en el dispositivo. Previamente a este sistema de desconexión, los inversores comerciales suelen constar de diversos sistemas de protección, desde aislamiento galvánico para evitar cortocircuitos a protecciones frente a sobretensión, temperaturas excesivas, etc. Resulta muy importante elegir el tipo adecuado de inversor dependiendo de dónde estará ubicado, pues algunos modelos rinden muy bien en interiores, pero pueden sufrir daños si se colocan en el exterior, donde la temperatura es mayor. Un último grupo de características destacables en un inversor son los datos que ofrece y la posibilidad de monitorización de los mismos. Casi todos los dispositivos comerciales ofrecen datos acerca de la instalación, como la potencia, tensión y corriente generadas, tanto en el lado de entrada (continua) como en el de salida (alterna). Esto es importante para llevar un control sobre nuestra producción, y de ese modo conocer de primera mano si nos ajustamos a lo previsto o, por el contrario, algo no está funcionando como debería. Los modelos actuales de inversor permiten guardar todos los datos medidos de forma cronológica en una tarjeta de memoria o incluso enviarlos directamente a internet, donde un servidor los aloja de modo que el dueño de la instalación tenga acceso a ellos como usuario del portal.

2.8. DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y PROTECCIÓN.

Para poder tener un control sobre nuestra instalación deberemos instalar dispositivos de medida y protección de manera que los equipos estén protegidos ante eventuales fallos o averías en el sistema. Como dispositivo de protección, se suele poner un interruptor magnetotérmico en la salida del inversor, es decir del lado de corriente alterna, que pueda cortar cualquier pico inesperado de corriente impidiendo daños posteriores. Además de esto los inversores suelen llevar su propia protección, por lo que no es necesario colocar interruptores en el lado de continua, aunque en ciertos casos se hace para duplicar la seguridad. También se suele instalar un interruptor por cada fase de nuestra instalación y otro adicional en la propia línea trifásica para disponer de protección extra, aunque esto no es imprescindible.

Según el grado de control que queramos para nuestra instalación, tendremos en cuenta una serie de dispositivos de medida. En ocasiones solo se precisa medir la irradiancia que reciben los módulos, en otras ocasiones también interesa medir otros parámetros como la temperatura o la velocidad del viento, e incluso existen instalaciones que no disponen de ningún tipo de sensor debido a que el usuario no quiere un seguimiento de estos parámetros. En el caso de nuestro proyecto, existirán multitud de sensores, ya que nuestro objetivo es analizar las magnitudes medidas para comparar distintos módulos, pero lo lógico es que en una instalación convencional, cuyo objetivo principal es producir la mayor cantidad de energía eléctrica con el menor coste, el número de sensores sea bastante más reducido que el que tenemos en este caso. Los sensores básicos de una instalación son los siguientes:

Medidor de irradiancia

Este sensor se basa en una pequeña célula fotovoltaica que genera una corriente continua de varios milivoltios, directamente relacionada con la cantidad de luz o radiación solar que incide sobre el sensor. Para medir los datos hay que calibrar el sensor, para modificar el umbral definido por el fabricante. Dentro de este grupo también se engloban los aparatos denominados piranómetros y albedómetros, que sirven para medir la irradiancia difusa y total, además de la directa. Estos sensores nos proporcionarán información directa sobre la cantidad de luz que está incidiendo sobre un generador fotovoltaico y sobre la energía eléctrica que éste puede producir. De este modo, sabremos a qué se deben las oscilaciones en la producción, las cuales pueden venir determinadas por condiciones naturales o por errores del sistema. Lo lógico es que la producción mantenga una evolución muy similar a la irradiación que recibe el generador, si el sensor detecta que hay mucha irradiación, pero se produce poca energía, algo está fallando.



Fig.2.22. Sensor de irradiación externa. Fuente: IMT Solar

Sensores de temperatura:

Otro dispositivo útil para ver las condiciones de trabajo de los paneles es el sensor de temperatura, ya que este parámetro es importante para el rendimiento de las células fotovoltaicas. Cuando tenemos temperaturas elevadas el rendimiento tiende a disminuir. Lo normal es colocar un sensor de temperatura ambiente y otro pegado en la zona trasera de uno de los módulos, para averiguar su temperatura de operación. Conociendo la diferencia entre ambos podemos justificar pérdidas o diferencias con el rendimiento calculado o anunciado por el fabricante. En proyectos como el que nos ocupa, en el que trabajamos con distintas tecnologías, es interesante comprobar cómo todos los módulos, sean del tipo que sean, se calientan de forma similar cuando están trabajando, pero existen ciertas diferencias entre sus temperaturas máximas.



Fig. 2.23. SensorBox, centralita que puede medir datos de irradiancia, temperaturas (ambiente y módulo) y velocidad del viento. Fuente: SMA.

Anemómetro:

Es un dispositivo que se utiliza para medir la velocidad del viento, y, en algunos casos, también su dirección. Es un parámetro que viene directamente relacionado con la temperatura, ya que ayuda a refrigerar los módulos, por lo que afecta en el rendimiento de un generador fotovoltaico, por esta razón es conveniente tenerlo controlado. Además el viento puede ser un problema a la hora de diseñar la estructura, pues los paneles se verán sometidos a una fuerza considerable cuando tengan que soportar rachas fuertes de viento.

Medidor de potencia y sistemas de monitorización:

Este dispositivo sirve para conocer la producción de energía generada por nuestra instalación. Se suele colocar a la salida del inversor, en el lado de corriente alterna, para medir la energía inyectada a red (en kWh). Los hay que además, llevan protección incorporada. La instalación de este aparato es interesante sobre todo para comparar el dato que arroja con el que ofrece el inversor, ya que éste último suele llevar incorporado un medidor de potencia propio, pero a veces los datos pueden no coincidir si existen pérdidas en las conexiones.

Existen, además, distintos sistemas de monitorización con los que hacer un seguimiento de la energía producida por la instalación, desde la adquisición de datos y su almacenamiento a los sistemas de monitorización en tiempo real vía web, pasando por la telemedida y sistemas de alarmas. Después de haber instalado multitud de sensores con los que obtener datos, luego hay que sacar algo en claro de ellos, para ellos se utilizan los sistemas de monitorización.

En el caso de nuestro proyecto, tenemos un sistema transmisor de datos que almacena la información registrada tanto en una tarjeta flash como en internet, para que la tengamos disponible en todo momento gracias a la aplicación web que ofrece la compañía. Cuando nos haga falta realizar una consulta, sólo hay que entrar en dicha aplicación, que además también permite descargar los datos para modificarlos o almacenarlos por nuestra cuenta si así lo queremos.

3. Descripción de la instalación

En este capítulo se va a proceder a la descripción de la instalación en estudio, describiendo su ubicación y características

3.1. Ubicación y orientación de la instalación en estudio

Nuestra instalación está situada en la cubierta del edificio Agustín Betancourt (comprendido entre las calles Butarque y Sabatini), el cual está situado en el campus de la Escuela Politécnica de Leganés, de la Universidad Carlos III de Madrid.



Fig. 3.1: Ubicación de la instalación. Imagen satélite. Fuente: Google maps.

Los módulos fotovoltaicos se encuentran entre la tercera y cuarta planta del edificio, y los inversores y dispositivos de monitorización se encuentran en una sala cubierta situada en una planta superior, para protegerlos de posibles averías por condiciones meteorológicas adversas.

Los módulos y sensores de la instalación están colocados sobre una estructura de acero rígida la cual proporciona una inclinación de 30 grados hacia el sur, orientación muy próxima a la óptima en España, que es de 34 grados. Se ha elegido esta orientación para favorecer la producción en verano (que es mayor) pese a perjudicar ligeramente la producción en invierno.

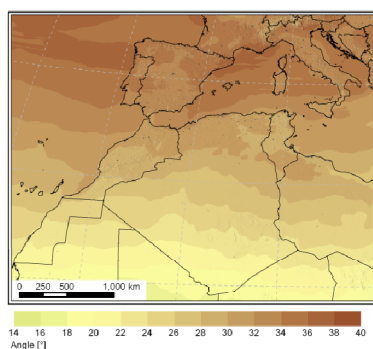


Fig. 3.2: Angulo óptimo de inclinación para un panel fotovoltaico. Fuente: Comisión Europea PVGIS.

3.2. Características de la instalación

En este capítulo se expondrán las tecnologías con las que cuenta la instalación completa, haciendo especial énfasis en aquellas tres que se estudiarán en los próximos capítulos.

3.2.1. Módulos fotovoltaicos

La instalación suma un total de potencia instalada de 7060 w distribuidas en siete tecnologías diferentes de generadores fotovoltaicos. Cada una de estas tecnologías está conectada a un inversor y los datos obtenidos de cada generador se analizan mediante un sistema de medida que registra valores como irradiancia, temperatura o potencia. La instalación cuenta con las siguientes tecnologías:

Tecnología de estudio	Tipo de tecnología	Numero de módulos	Potencia por módulo	Potencia total
1	Silicio policristalino [p-Si]	5	225	125
2	Sulfuro de Cadmio/Teluro de Cadmio (Lamina delgada) [CdS/CdTe]	10	80	800
3	Silicio monocristalino y capas de silicio amorfo [HIT Gen 1]	5	235	1175
-	Lamina delgada Micromorfo [a-Si/ μ c]	8	120	960
-	Silicio amorfo [a-Si]	10	90	900
-	Cobre Indio Selenio [CIS]	12	80	960
-	Silicio monocristalino y capas de silicio amorfo [HIT Gen 2]	6	190	1140

Fig. 3.3: Tabla de las diferentes tecnologías de la instalación.

Según el siguiente esquema podemos ver las diferentes partes de la instalación agrupados por su tecnología. Incluye el número de los paneles fotovoltaicos de cada generador, los inversores y los sensores asociados a ellos (Sensorbox) con su número de referencia.

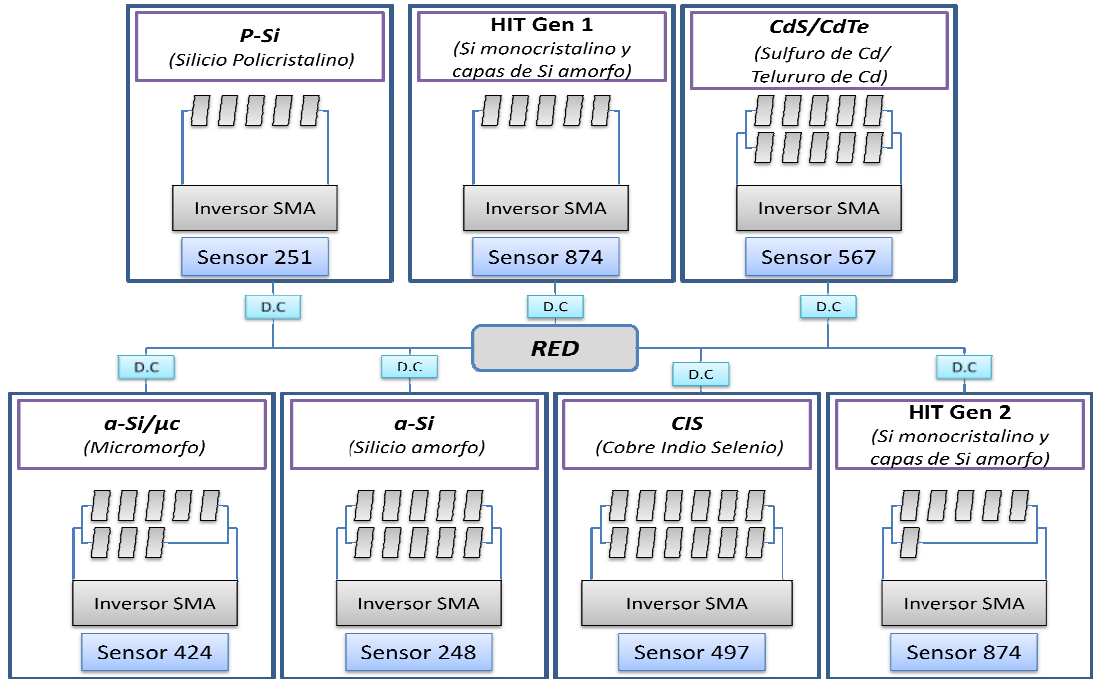


Fig. 3.4: Esquema de las tecnologías de la instalación.

3.2.2. Inversores

Se han empleado 7 inversores Sunny Boy de la compañía SMA, uno por cada tecnología utilizada. Cada inversor es de 1200 W, con una topología de transformador en baja frecuencia. Los inversores están protegidos de las condiciones atmosféricas al estar situado en una sala cubierta junto a los elementos de medida y protección.



Fig. 3.5: Inversores y cuadro con los elementos de protección

En la siguiente imagen vemos la toma de red, que consiste en una manguera conectada a una toma, que tiene su propia protección adicional para evitar cualquier incidente. Antes de unirse para formar esta manguera cada conductor de corriente alterna proviene de cada inversor y llega al cuadro general donde pasa por un contador de potencia y un interruptor de protección.



Fig. 3.6: Conexión a red de la instalación

3.2.3. Dispositivos de medida. Sensores

La instalación cuenta con diversos sensores, que son los encargados de recoger los datos de irradiancia, temperatura o viento de cada tecnología que se dan en la instalación, para así poder analizar las distintas magnitudes que soporta cada módulo.

Cada tecnología dispone de una unidad Sunny Sensorbox, la cual tiene una sonda de temperatura para poder monitorizar el calentamiento de los paneles en situaciones diversas. La unidad Sunny Sensorbox también cuenta con una célula de irradiancia que al estar colocada a la misma inclinación que los paneles nos muestra la irradiancia que reciben. Estos datos se centralizan en la propia unidad y se monitorizan mediante el sistema de comunicación.



Fig. 3.7: Sensor de irradiancia y temperatura "Sunny Sensorbox". Fuente: SMA

La instalación también cuenta con un anemómetro para medir la velocidad del viento, ya que es un factor clave para ver analizar el rendimiento así como la relación entre irradiancia y temperatura, debido a que cuanto más viento hay menos se calientan los módulos pese estar recibiendo una elevada irradiancia. Además hay que tenerlo en cuenta para una instalación fotovoltaica ya que los paneles deben soportar una fuerza considerable al recibir fuertes rachas de viento.



Fig. 3.8: Anemómetro de la instalación

3.2.4. Dispositivos de comunicación



El principal elemento del sistema de comunicación el "WebBox", que almacena los datos recibidos a través de los cables de comunicación (RS485 de transmisión de datos) para almacenarlos tanto en una tarjeta de memoria como en internet a través del portal "Sunny Portal" de la compañía.

Fig. 3.8: Imagen del dispositivo WebBox. Fuente: SMA

Toda la información es grabada en tiempo real en este portal, donde se puede consultar desde cualquier ordenador o dispositivo móvil los todos los datos de la instalación como producción en tiempo real y rendimiento, así como obtener informes y gráficas de los datos aportados por los sensores.



Fig. 3.9: Imagen de Sunny Portal.

4. Resultados mediante simulación

Existen diversos software de simulaciones para sistemas fotovoltaicos que permiten prever de forma más o menos aproximada como se comportara una tecnología concreta, en función del grado de precisión que se desee. Este tipo de herramientas son muy útiles para tener una idea aproximada de cómo se comportara una instalación en una determinada situación, pudiendo analizar factores como el rendimiento, rentabilidad, la producción o la eficiencia y también permitiéndonos comparar distintas tecnologías en esas situaciones.

Para este proyecto se ha utilizado el software PVGIS, Photovoltaic Geographical Information System, creado por el Joint Reseach Center, JCR, que cuenta con una base de datos que se actualiza periódicamente. Mediante este programa se pueden obtener los datos de sol y seleccionando los datos geográficos del Campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid.

Datos geográficos de Leganés	
<i>Latitud</i>	40°19'36" N
<i>Longitud</i>	3°45'44" W
<i>Altitud</i>	666 m
<i>Orientación plano receptor</i>	30 °

Fig. 4.1: Datos geográficos de Leganés. Fuente: PVGIS.

<i>Month</i>	<i>Hh</i>	<i>D/G</i>	<i>T24h</i>
<i>Jan</i>	2050	0.43	6.3
<i>Feb</i>	3120	0.36	7.7
<i>Mar</i>	4450	0.37	11.0
<i>Apr</i>	5650	0.36	12.8
<i>May</i>	6550	0.35	16.9
<i>Jun</i>	7650	0.28	22.7
<i>Jul</i>	7940	0.22	25.1
<i>Aug</i>	6930	0.25	24.7
<i>Sep</i>	5340	0.28	20.4
<i>Oct</i>	3590	0.34	15.6
<i>Nov</i>	2370	0.40	9.6
<i>Dec</i>	1900	0.45	6.6
<i>Year</i>	4800	0.31	15.0
<i>Hh</i>	<i>Irradiation on horizontal plane (Wh/m2/day)</i>		
<i>D/G</i>	<i>Ratio of diffuse to global irradiation</i>		
<i>T24h</i>	<i>24 hour average of temperature (°C)</i>		

Fig. 4.2: Datos del sol de Leganés. Fuente: PVGIS.

Una vez guardados los datos solares del emplazamiento, podemos entrar en el software PVSyst donde los cargaremos y empezaremos nuestra simulación. Este software ofrece una solución muy aproximada de nuestra tecnología, ya que cuenta con multitud de fabricantes de módulos solares así como de inversores en su base de datos, además permite concretar factores como la inclinación, ventilación de los generadores o las distintas pérdidas que sufre nuestra instalación. En nuestro caso hemos elegido unas pérdidas de carácter estándar establecidas por defecto en el software del PVSyst.

El objetivo de esta simulación es tener una previsión sobre la producción energética de cada uno de nuestros generadores durante un año completo (2012), la cual se comparará con los mismos datos obtenidos de la aplicación SunnyPortal, aplicación de la compañía SMA que se puede seguir a través de internet, y también proporciona los datos para un año completo. Así si algún valor está muy fuera de rango podremos comprobar si es correcto o se ha debido a algún tipo de error.

Las comparaciones que haremos a continuación serán principalmente de la energía producida cada mes a la salida del generador, midiendo para cada mes y haciendo una comparación final entre la energía total de cada año así como del promedio de este año 2012. Los datos obtenidos en el software PVSyst son generados en un informe que se incluye en Anexo II.

4.1. Silicio Policristalino:

Mes	<i>Datos de la Simulación</i>	<i>Datos experimentales</i>
	E Array (kWh)	E (kWh)
Enero	107,1	127,074
Febrero	126,6	153,684
Marzo	171,9	175,317
Abril	178,8	145,745
Mayo	189,5	187,106
Junio	196,7	186,951
Julio	212,5	205,42
Agosto	204,8	195,263
Septiembre	180,8	157,202
Octubre	148,8	135,645
Noviembre	114,2	83,356
Diciembre	104,7	58,904
Promedio	161,37	150,97
Total Año	1936,40	1811,67

Fig. 4-3: Comparación entre datos teóricos y simulados para la tecnología silicio policristalino.
Fuente: PVSyst y SunnyPortal.

Como se puede observar en la tabla de la figura 4.3 los datos experimentales obtenidos se aproximan mucho a los teóricos obtenidos mediante el programa de simulación PVSyst aunque podemos ver que hemos obtenido unos valores ligeramente más bajos debido a que en verano se han producido más pérdidas debido a las altas temperaturas. En los meses con temperaturas menores tenemos una producción mayor que en los resultados experimentales, lo cual es lo esperado en la tecnología de Silicio Policristalino, que pierde más rendimiento con las altas temperaturas.

4.2. HIT Gen1:

Mes	Datos de la Simulación	Datos experimentales
	E Array (kWh)	E (kWh)
Enero	114,3	124,532
Febrero	136,3	154,815
Marzo	187	181,507
Abril	195,6	151,991
Mayo	209,2	198,936
Junio	220,1	197,786
Julio	239,8	220,992
Agosto	230,6	209,484
Septiembre	201,2	163,671
Octubre	162,7	136,33
Noviembre	122,6	81,926
Diciembre	111,3	57,065
Promedio	177,56	156,59
Total Año	2130,70	1879,04

Fig. 4.4: Comparación entre datos teóricos y simulados para la tecnología HIT. Fuente: PVSyst y SunnyPortal.

Como podemos ver en la tabla de la figura 4.4 los datos experimentales obtenidos se alejan ligeramente de los teóricos obtenidos mediante el programa de simulación PVSyst, esto puede ser debido a que las pérdidas que tienen estos paneles son mayores que las esperadas. Como podemos ver este tipo de tecnología funciona especialmente peor a lo esperado en condiciones de temperaturas bajas.

4.3. CdS/CdTe:

Mes	Datos de la Simulación	Datos experimentales
	E Array (kWh)	E (kWh)
Enero	78,2	81,201
Febrero	93,2	96,416
Marzo	128,1	113,303
Abril	134,2	94,021
Mayo	143,9	125,201
Junio	152	126,097
Julio	166	140,547
Agosto	159,5	133,141
Septiembre	138,7	104,145
Octubre	111,7	86,883
Noviembre	83,9	50,698
Diciembre	76	35,555
Promedio	122,12	98,93
Total Año	1465,40	1187,21

Fig. 4.5: Comparación entre datos teóricos y simulados para la tecnología de Cadmio Teluro.

Fuente: PVSyst y SunnyPortal.

Como se puede observar en la tabla de la figura 4.5 los datos experimentales obtenidos se aproximan a los teóricos obtenidos mediante el programa de simulación PVSyst aunque podemos ver que hemos obtenido unos valores ligeramente más bajos especialmente los meses de altas temperaturas, aunque no es una variación muy significativa. En los meses con temperaturas bajas como es Enero y Febrero tenemos una producción mayor que en los resultados experimentales, lo cual es lo esperado en la tecnología de Cadmio Teluro.

4.4. Comparación aproximada entre las tecnologías

Tecnología	Datos de la Simulación		Datos experimentales	
	Promedio	Total Año	Promedio	Total Año
Silicio Policristalino	161,3666667	1936,4	150,97225	1811,667
HIT	177,5583333	2130,7	156,58625	1879,035
Cadmio Teluro	122,12	1465,4	98,93	1187,21

Como podemos ver la tecnología HIT es la que mayores resultados a dado tanto en valores promedio como en la producción total. Esto era lo esperado, porque es la tecnología más moderna que más potencia instalada presenta pese a ser la que menos superficie tiene. Es la que mejores resultados está dando, aunque como podemos ver la diferencia de productividad es menor en el caso experimental que en el teórico, lo cual puede ser debido a unas mayores pérdidas en estos paneles que las que se esperan en un primer momento.

La siguiente tecnología que mayor producción a dado es la de Silicio policristalino, dejando bastante atrás a la tecnología de Cadmio Teluro, que ha dado una productividad más baja, como era de esperar por sus características técnicas y porque es la tecnología con menor potencia instalada de las tres.

5. Análisis de resultados

En este capítulo vamos a realizar la parte más importante del proyecto que es el análisis de la producción, el rendimiento y el Performance Ratio, así como la comparación de estos valores en las tres tecnologías que estamos estudiando.

Para ello vamos a realizar el análisis en el periodo de un año natural comprendido entre los meses de mayo de 2012 y de Abril de 2013, distinguiendo entre dos grupos principales en función de la irradiancia recibida, que serán días soleados y días nublados.

Para el estudio comparativo de las tres tecnologías vamos a seguir una serie de pasos que conformarán el procedimiento para poder comparar finalmente la producción y el rendimiento de cada generador:

- En primer lugar se elegirán los días muy soleados y muy nublados a través de la aplicación SunnyPortal de la compañía SMA. Esto lo sabremos viendo las curvas de irradiancia de cada día.
- Posteriormente analizaremos los datos de cada día viendo los valores de temperatura, irradiancia y viento que se han dado ese día y mostrándolos en gráficas aclarativas.
- Más tarde se presentará una tabla que se puede dividir en tres partes, siendo la primera la definición de las tecnologías en estudio, la segunda los datos aportados por SunnyPortal para cada tecnología de ese día diferenciando entre valores totales del día y valores de las horas de sol, y una tercera parte que la que se calcularán los valores a estudiar como son la eficiencia, el PR o la productividad.
- Para la realización de la tercera parte de la tabla aplicaremos las ecuaciones presentadas en el Anexo I.
- Después se representarán los valores obtenidos en gráficas y se analizará la diferencia de las tecnologías para ese día.
- En último lugar se compararán los resultados obtenidos en días soleados con los obtenidos en días nublados, y se obtendrán las conclusiones finales del proyecto y obtener así las mejores propiedades de cada tecnología.

5.1. Análisis de los días soleados

En primer lugar analizaremos los días soleados, que han sido elegidos aleatoriamente dentro del periodo especificado. Para ellos hemos utilizado la aplicación SunnyPortal donde podemos ver la irradiancia incidente. Con estos datos hemos hecho una gráfica en función a la hora del día, y aquellos días que presentan una gráfica con la forma de una campana de Gauss, son considerados días muy soleados, ya que al no haber picos, se indica que durante todo el día la irradiación ha sido constante. Además estos días presentan una irradiancia superior a los 1000 W/m^2 .

Distinguiremos entre irradiancia diaria, e irradiancia en las horas de sol, que es cuando los inversores están produciendo energía, en un día soleado tendremos una irradiancia media de aproximadamente 700 W/m^2 . En un primer análisis podemos considerar que tanto la irradiancia como la temperatura y el viento son iguales, ya que se han tomado datos de un sensor externo de la instalación común para todos.

Posteriormente se analizarán los datos de irradiancia y temperaturas concretos de cada generador.

Para comparar los diversos generadores tenemos que referir los datos de potencia a datos normalizados, para ello uno de los índices normalizados se medirá en kWh/kWp , indicando la potencia producida en función de la potencia instalada. Otro índice representativo será la producción en función de la superficie ocupada y se mide en kWh/m^2 . En último lugar se analiza el PR y el rendimiento, que son factores que tienen en cuenta tanto la producción como el resto de factores externos, y que mide la calidad de una tecnología, como se ha mencionado anteriormente tenemos los datos detallados de sus ecuaciones en el Anexo I.

5.1.1. Día soleado, 24 de Mayo de 2012:

Datos de la instalación		
Fecha	24 mayo de 2012	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente($^{\circ}\text{C}$)	34.74	43.56
Irradiancia (kW/m^2)	329.85	527.76

Tabla 5.1: Descripción del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

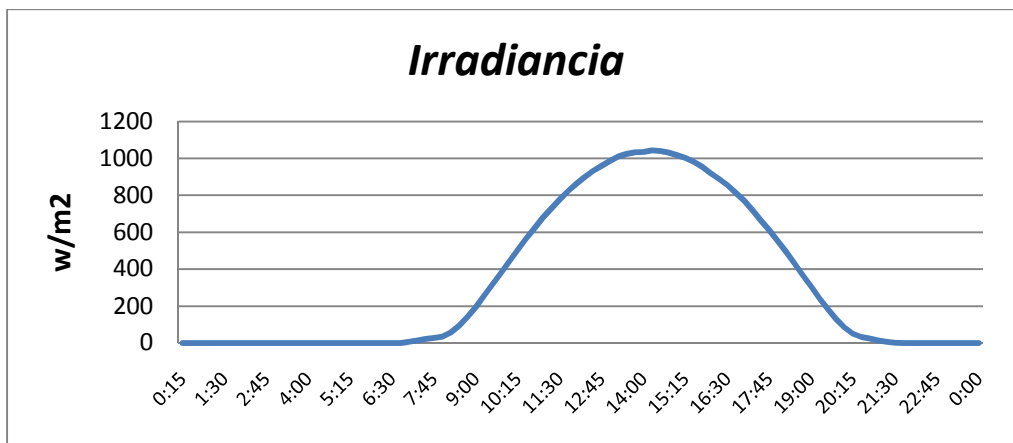


Fig. 5.1: Gráfica de la Irradiancia del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

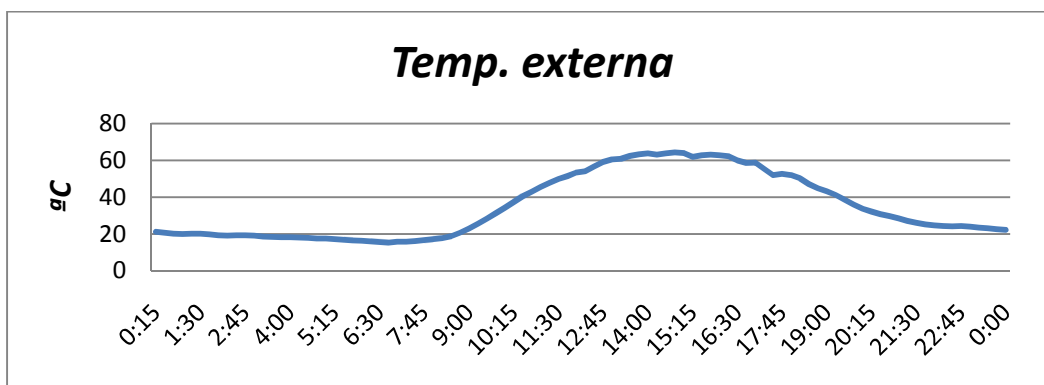


Fig. 5.2: Gráfica de la Temperatura del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

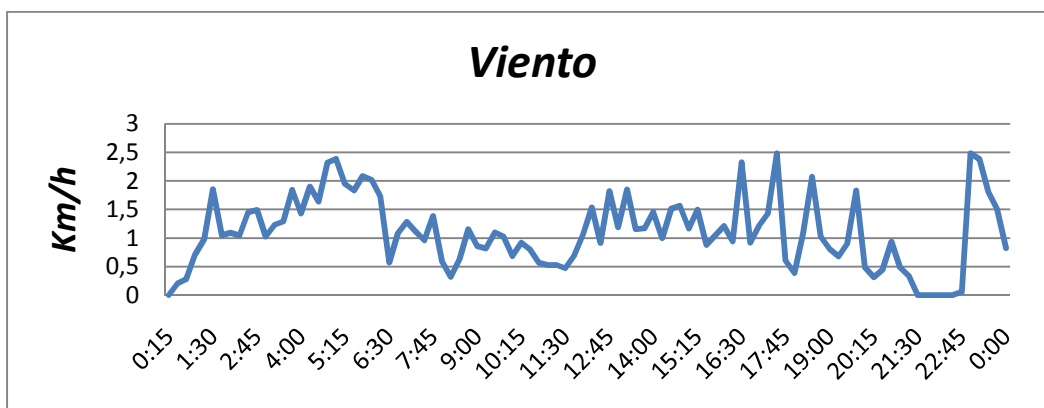


Fig. 5.3: Gráfica del viento del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	14,25	14,5	13,75
Prod (kWh)	4,63	6,828	7,377
Tª.med (.C)	34,09	33,89	33,3
Tª.med horas sol (°C)	43,51	43,64	43,82
Irr med.(W/ m²)	342,86	360,05	319,97
Irr med. h.sol (W/ m²)	548,57	585,74	548,52
Viento medio (Km/h)	1,102		
Viento h. sol (Km/h)	1,02		
Análisis de producción			
P gen (W)	324,91	470,90	536,51
Prod (%)	24,39	35,34	40,27
Yf	5,79	6,07	6,28
Prod sup (kWh/ m²)	0,64	0,84	1,17
Rendimiento (%)	8,23	9,93	15,53
PR (%)	74,04	71,46	83,24

Tabla 5.2 Análisis del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

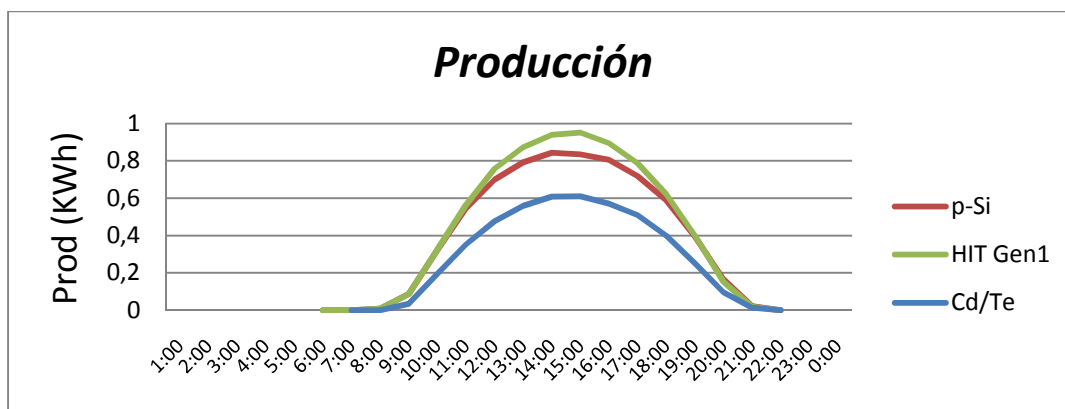


Fig. 5.4: Gráfica de la Producción del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

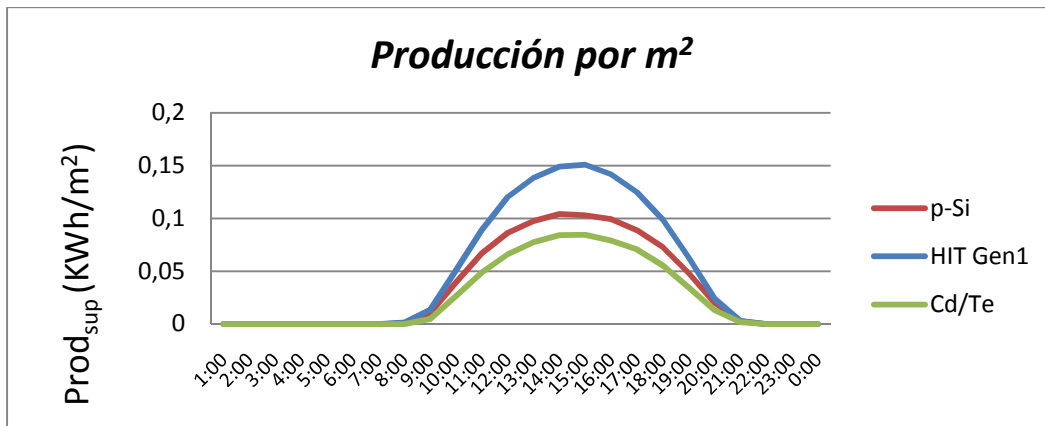


Fig. 5.5: Gráfica de la Producción por m² del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

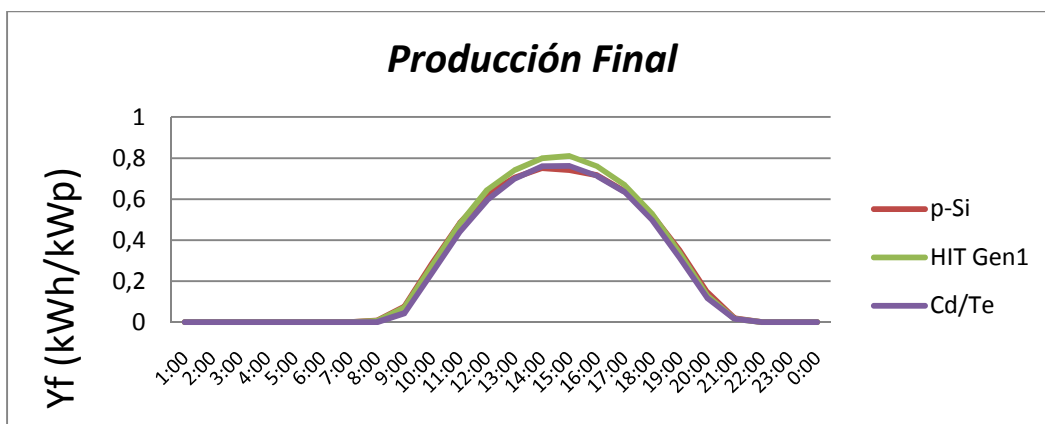


Fig. 5.6: Gráfica de la Producción final del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

En primer caso de día soleado correspondiente al 24 de Mayo de 2012, la tecnología que ha dado una mayor energía aportada a la red es la tecnología mixta HIT Gen1 seguida por la tecnología de Silicio Policristalino y después por la de Cadmio Teluro, y presentan unos porcentajes de producción en torno a 40% HIT Gen1, 35% Si-p y 24% Cd/Te.

La tecnología mixta HIT Gen1 destaca en la gráfica de producción energética por superficie de los paneles, seguida por la de Si-p y la de Cd/Te, estas dos más cercanas entre sí.

La producción final es prácticamente igual en todas las tecnologías, lo que indica un buen dimensionamiento, y una buena respuesta de cada tecnología en función de la potencia nominal de cada panel.

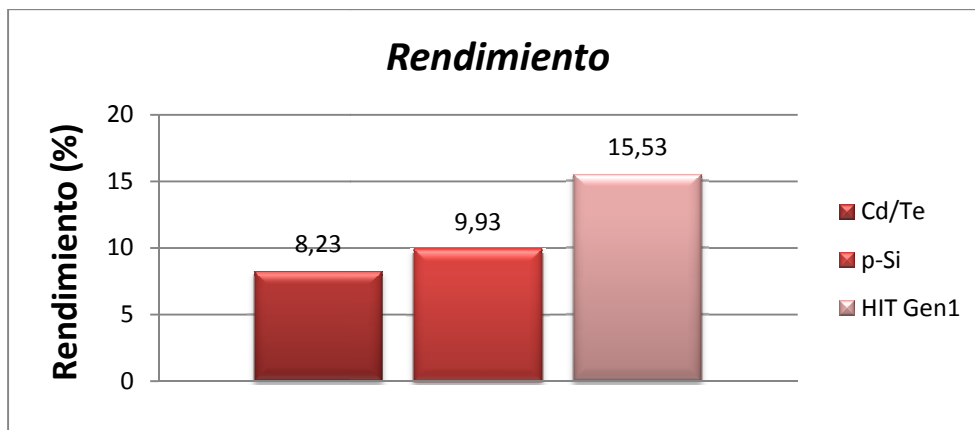


Fig. 5.7: Gráfica del Rendimiento del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

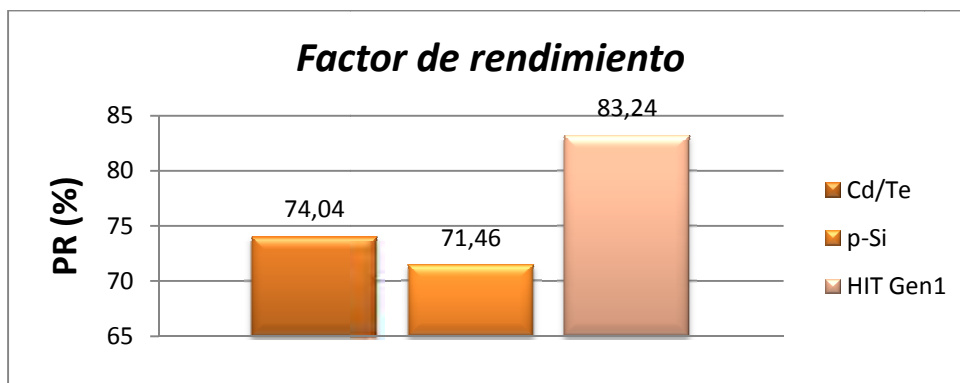


Fig. 5.8: Gráfica del Factor de Rendimiento del 24 de Mayo de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Podemos ver que la tecnología HIT Gen1 tiene un mejor Rendimiento y PR mejor que las otras dos, lo que la hace la mejor tecnología en cuanto a sus propiedades. La tecnología de Cd/Te tiene un menor rendimiento que la de la tecnología de Si-p, sin embargo presenta un mejor PR, lo que la hace interesante, al ser este dato el que demuestra la calidad de la tecnología.

5.1.2. Día soleado, 16 de Junio de 2012:

Datos de la instalación		
Fecha	16 de Junio de 2012	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	31,22	37,12
Irradiancia (kW/m²)	329.39	510.04

Tabla 5.3: Descripción del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

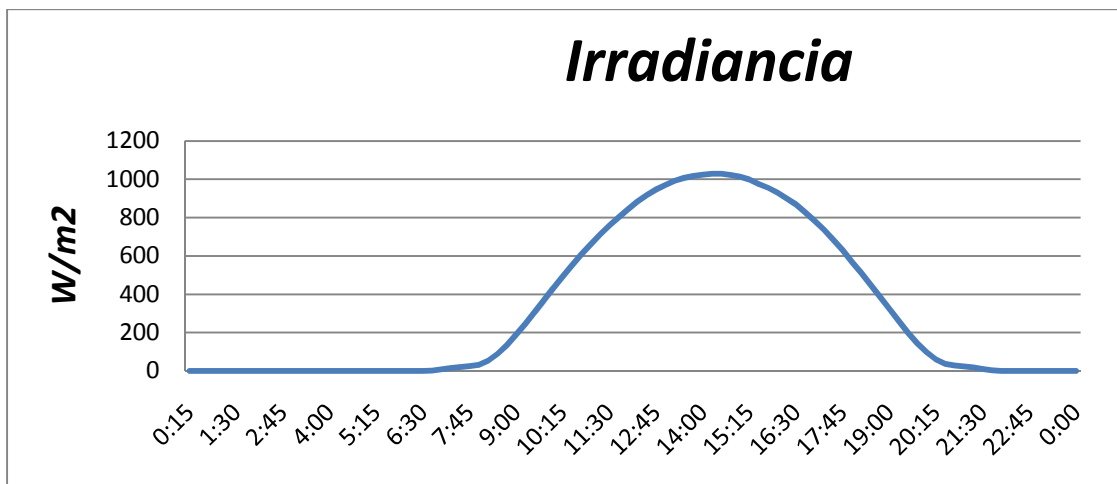


Fig. 5.9: Gráfica de la Irradiancia del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

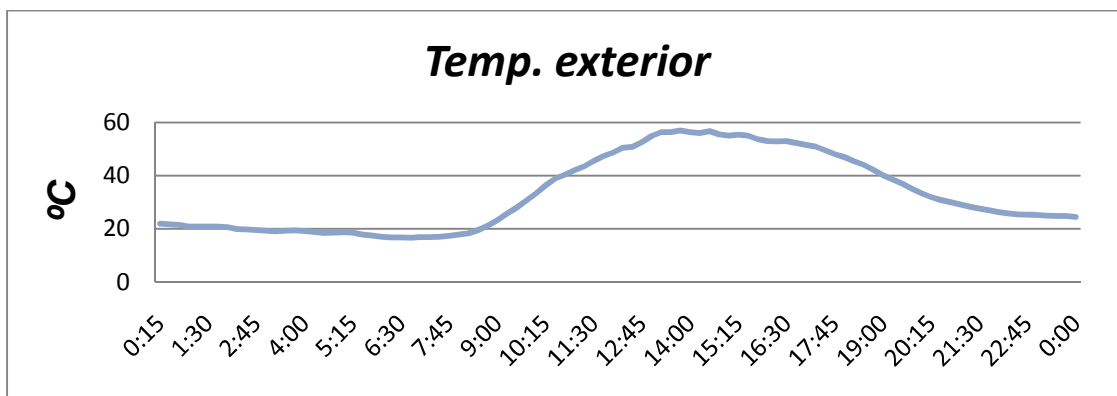


Fig. 5.10: Gráfica de la Temperatura del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

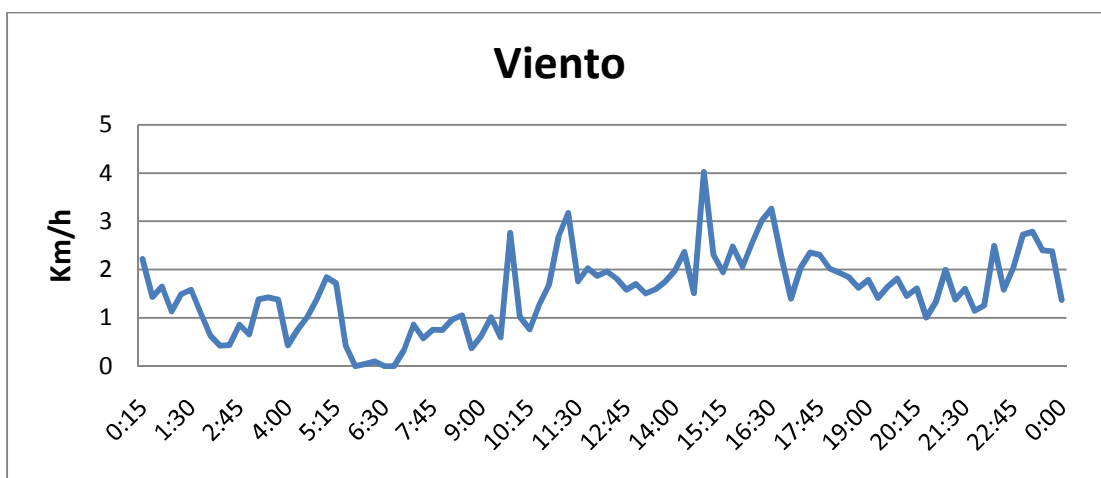


Fig. 5.11: Gráfica del viento del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	15,15	15	14,5
Prod (kWh)	4,74	7,004	7,495
Tª.med (.C)	32,47	32,3	32,18
Tª.med horas sol (°C)	39,842	39,74	40,19
Irr med.(W/ m²)	340,58	362,24	320,54
Irr med. h.sol (W/ m²)	536	569,94	521,56
Viento medio (Km/h)	1,53		
Viento h. sol (Km/h)	1,68		
Análisis de producción			
P gen (W)	312,87	466,93	516,90
Prod (%)	24,13	36,01	39,86
Yf	5,93	6,23	6,38
Prod sup (kWh/ m²)	0,66	0,86	1,19
Rendimiento (%)	8,11	10,11	15,73
PR (%)	72,96	72,82	84,35

Tabla 5.4: Análisis del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

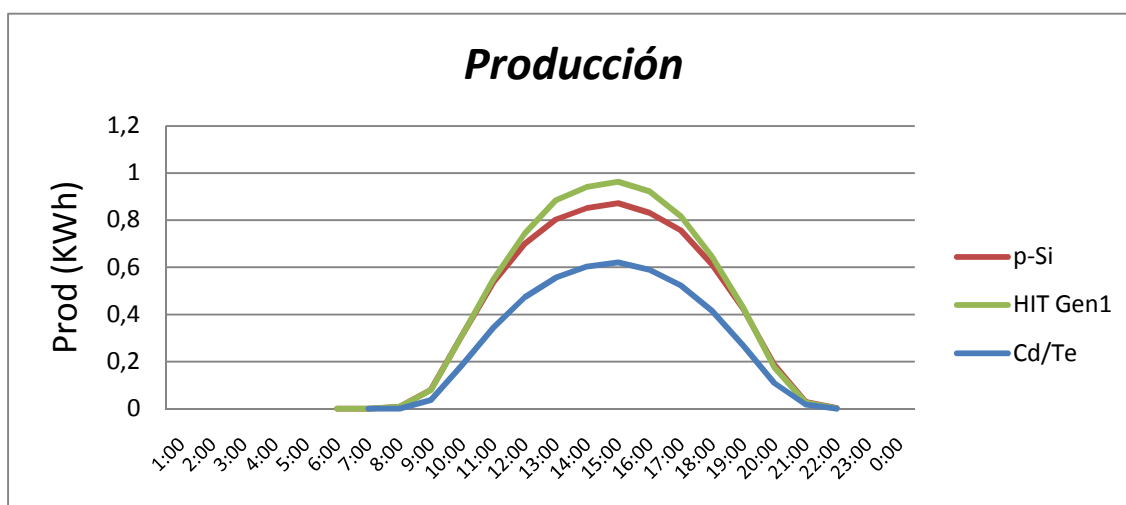


Fig. 5.12: Gráfica de la Producción del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

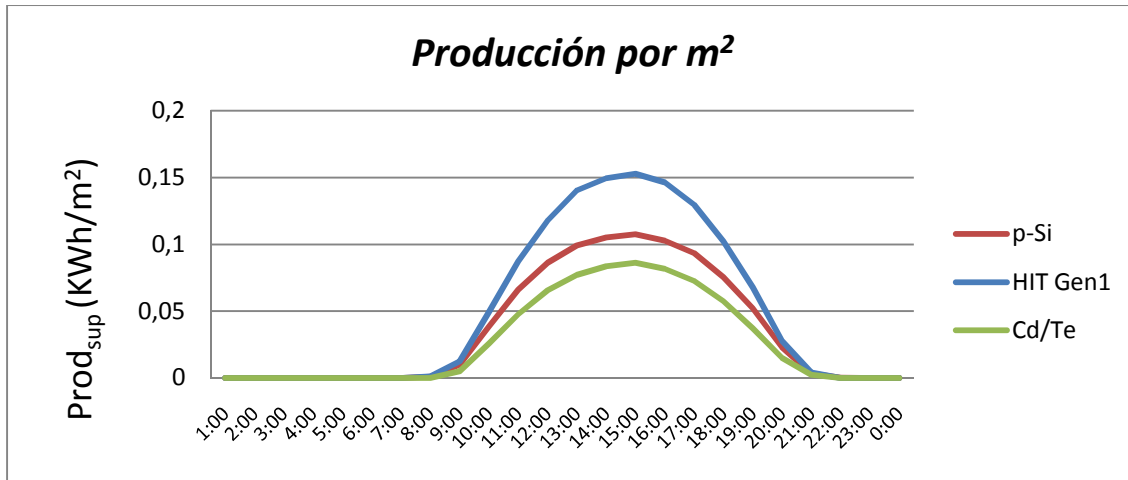


Fig. 5.13: Gráfica de la Producción por m² del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

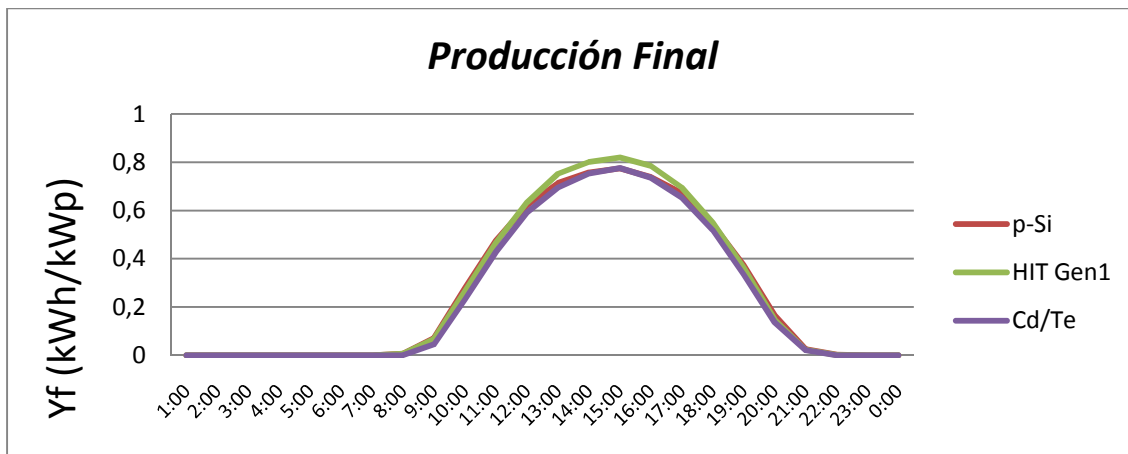


Fig. 5.14: Gráfica de la Producción final del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Para el segundo día de estudio correspondiente al día 16 de Junio de 2012, la tecnología que ha dado una mayor energía aportada a la red es la tecnología mixta HIT Gen1 aportando entorno al 40 % de producción, seguida de cerca por la tecnología de silicio policristalino en torno al 36 % de la producción y por último está la tecnología de Cd/Te bastante por detrás con 24% de la producción total.

En cuanto a la producción según la superficie instalada la tecnología híbrida HIT Gen1 es la que mayores valores tiene al producir más energía con menos superficie, en este caso, bastante diferenciada de los otros dos generadores. Las otras dos tecnologías están más parejas, pese a que la tecnología de Silicio policristalino vuelve a estar por encima de la de Cd/Te.

En cuanto a la producción según la potencia instalada se puede ver que todas las tecnologías están casi al mismo nivel, siendo nuevamente la tecnología híbrida HIT Gen1 la que tiene ligeramente mejores resultados. Esto era previsible y nos indica que los paneles tienen una respuesta energética esperada en función de la potencia nominal de cada panel.

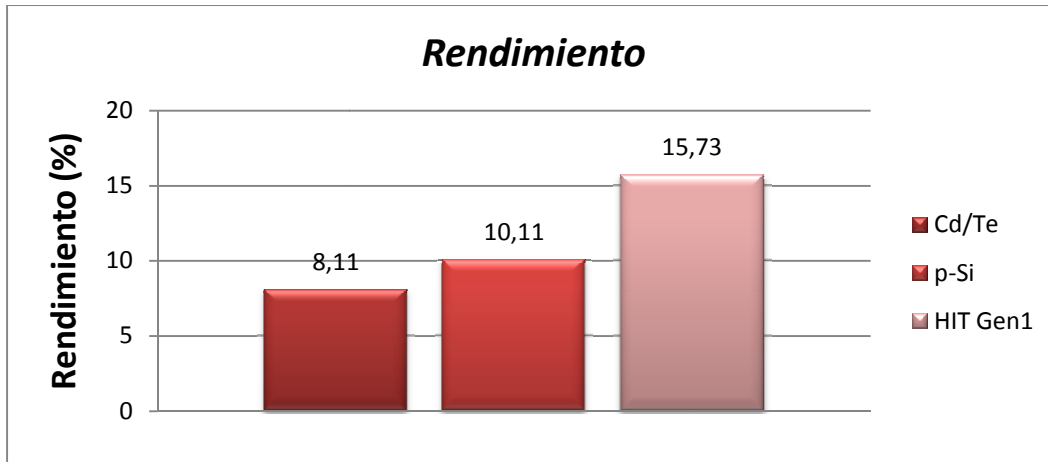


Fig. 5.15: Gráfica del Rendimiento del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

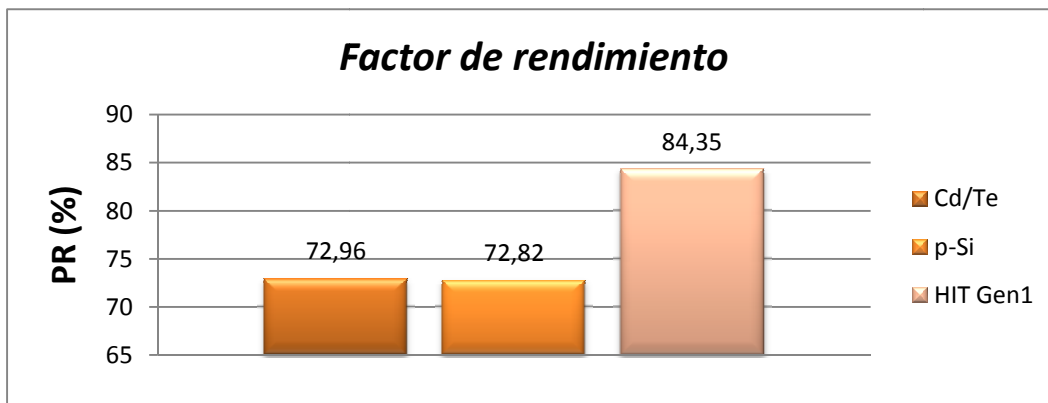


Fig. 5.16: Gráfica del Factor de Rendimiento del 16 de Junio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Se puede ver que la tecnología híbrida tiene un mejor Rendimiento y PR que las otras dos, con una diferencia muy notable, lo que dota a esta tecnología de las mejores propiedades. La tecnología de Cd/Te tiene un PR casi igual al de Silicio policristalino, aunque su rendimiento es ligeramente peor lo que se puede deber a las altas temperaturas.

5.1.3. Día soleado, 14 Septiembre de 2012:

Datos de la instalación		
Fecha	14 Septiembre de 2012	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	31.62	43.53
Irradiancia (kW/m²)	313.88	579.48

Tabla 5.5: Descripción del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

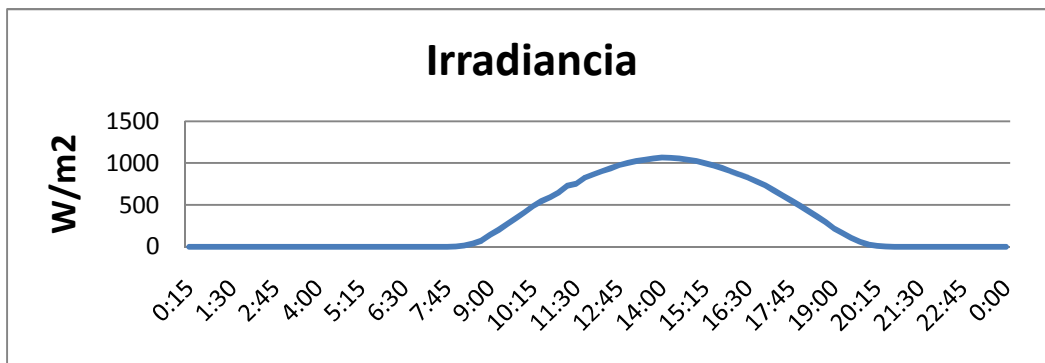


Fig. 5.17: Gráfica de la Irradiancia del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

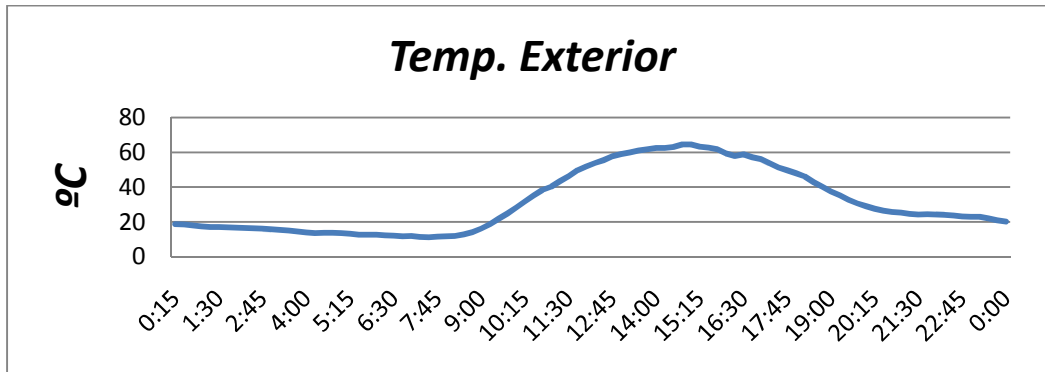


Fig. 5.18: Gráfica de la Temperatura del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

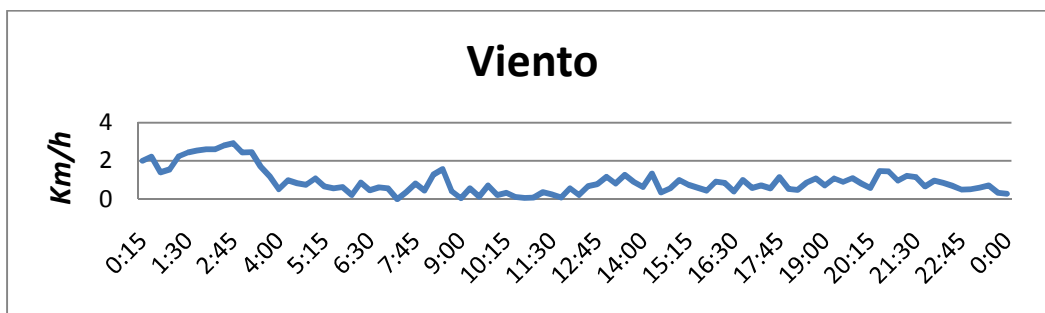


Fig. 5.19: Gráfica del viento del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	12,5	12,5	12
Prod (kWh)	4,373	6,575	6,961
Tª.med (.C)	31,06	30,87	30,08
Tª.med horas sol (°C)	38,26	43,74	43,46
Irr med.(W/ m²)	313,88	325,04	300,76
Irr med. h.sol (W/ m²)	579,48	611,83	589,25
Viento medio (Km/h)	0,9231		
Viento h. sol (Km/h)	0,6821		
Análisis de producción			
P gen (W)	349,84	526,00	580,08
Prod (%)	24,03	36,13	39,84
Yf	5,47	5,84	5,92
Prod sup (kWh/ m²)	0,61	0,81	1,10
Rendimiento (%)	8,38	10,61	15,63
PR (%)	75,46	76,42	83,78

Tabla 5.6: Análisis del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

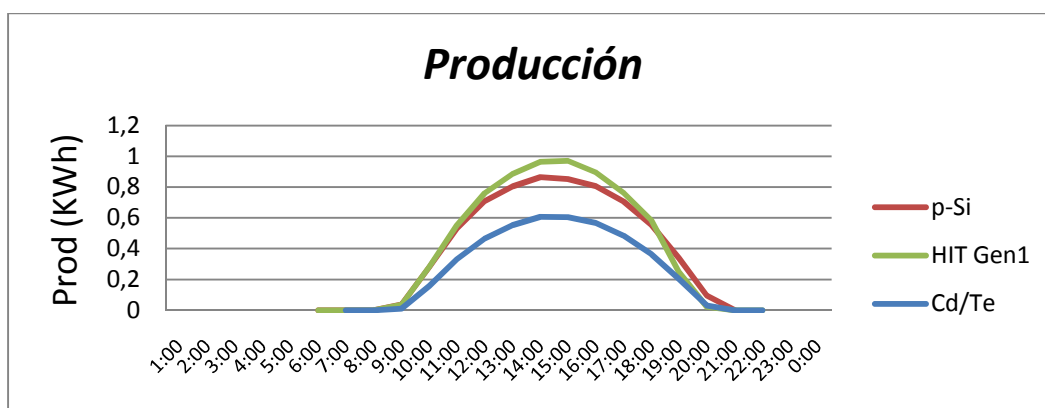


Fig. 5.20: Gráfica de la Producción del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

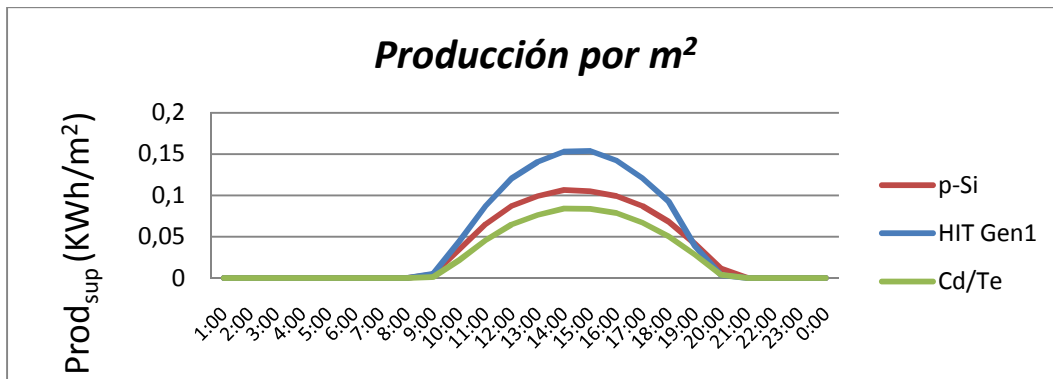


Fig. 5.21: Gráfica de la Producción por m² del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

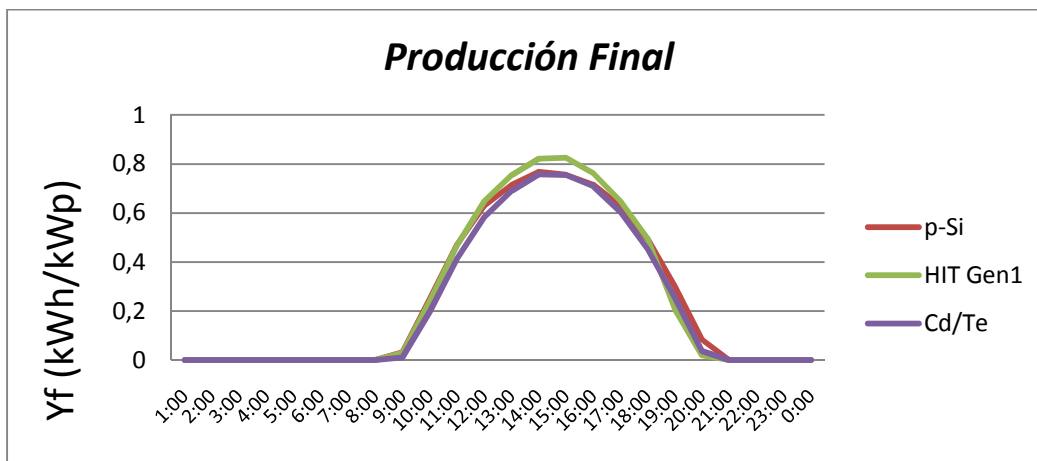


Fig. 5.22: Gráfica de la Producción final del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Para el tercer día soleado perteneciente al mes de Septiembre vemos que sigue la misma tendencia de los días anteriores, destacando en la aportación de energía a la red así como en la producción de energía por metro cuadrado de superficie. La tecnología de Silicio Policristalino presenta una producción de energía muy alta más cercana a la tecnología HIT que a la de Cadmio Teluro.

En cuando a la producción por metro cuadrado de superficie las tecnologías Si-p y Cd/Te están más próximas, y en la producción final las tres tecnologías están muy parejas al igual que en los días anteriores.

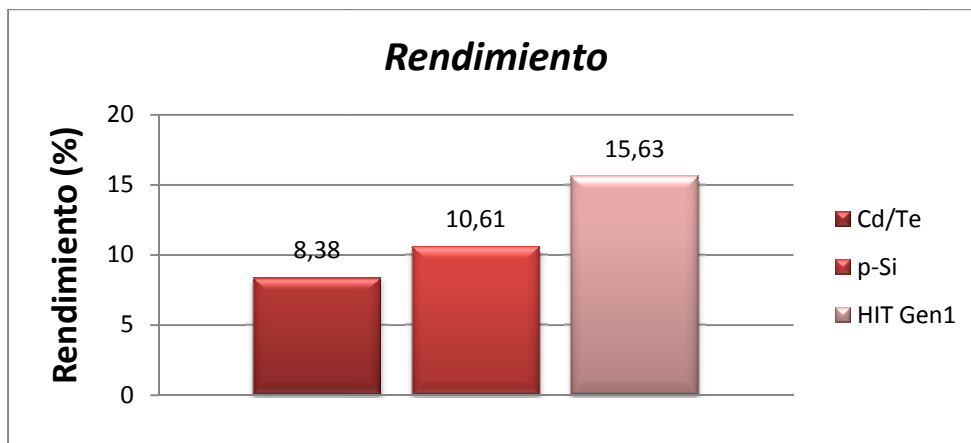


Fig. 5.23: Gráfica del Rendimiento del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

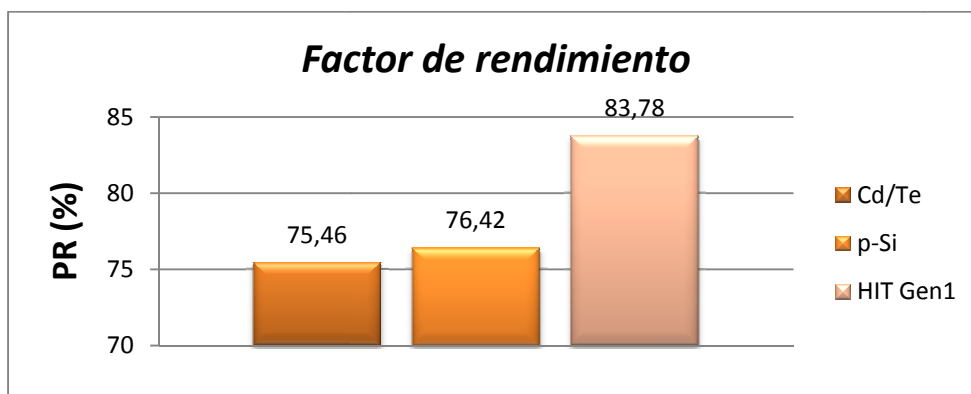


Fig. 5.24: Gráfica del Factor de Rendimiento del 14 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

En este caso las tendencias son casi iguales que en el primer día destacando mucho la tecnología híbrida HIT tanto en rendimiento como en PR.

La tecnología de Cd/Te tiene un menor rendimiento que la de la tecnología de Si-p, al igual que un menor PR, y estos datos nos van dando una idea clara de cómo actúan las tecnologías en estas situaciones

5.1.4. Día soleado, 14 de Abril de 2013:

Datos de la instalación		
Fecha	14 de Abril de 2013	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	27.82	38.08
Irradiancia (kW/m²)	322.18	562.35

Tabla 5.7: Descripción del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

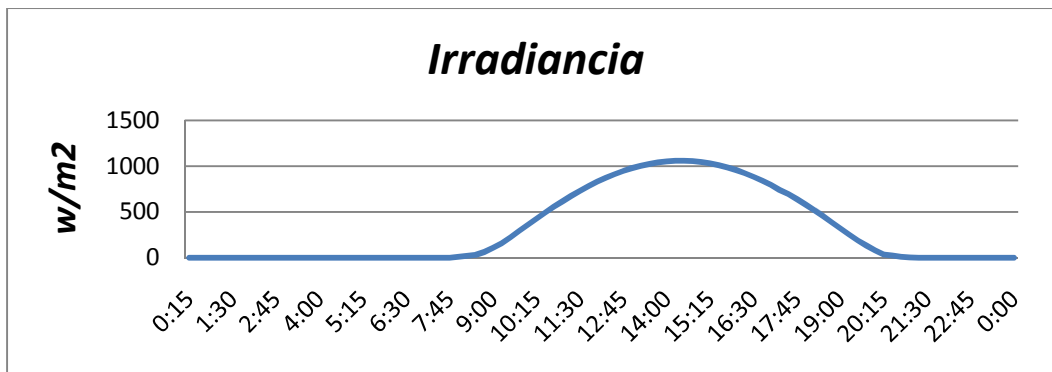


Fig. 5.25: Gráfica de la Irradiancia del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

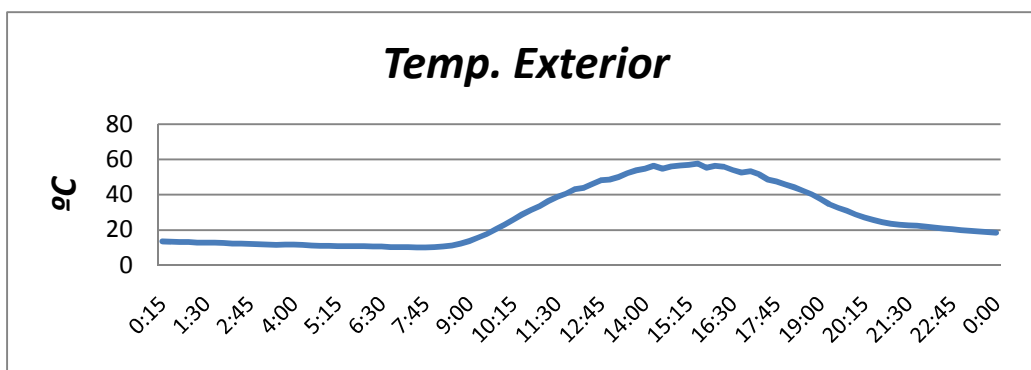


Fig. 5.26: Gráfica de la Temperatura del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

En este día, el diagrama de viento no está disponible, quizás sea por un error.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	13,5	13,25	12,75
Prod (kWh)	4,573	6,916	7,347
Tª.med (.C)	27,05	26,96	26,32
Tª.med horas sol (°C)	37,86	38,27	37,72
Irr med.(W/ m ²)	335,48	344,37	311,97
Irr med. h.sol (W/ m ²)	585,45	611,97	575,94
Viento medio (Km/h)	-	-	-
Viento h. sol (Km/h)	-	-	-
Análisis de producción			
P gen (W)	338,74	521,96	576,24
Prod (%)	23,57	36,32	40,10
Yf	5,72	6,15	6,25
Prod sup (kWh/ m ²)	0,64	0,85	1,17
Rendimiento (%)	8,04	10,53	15,88
PR (%)	72,32	75,82	85,15

Tabla 5.8: Análisis del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

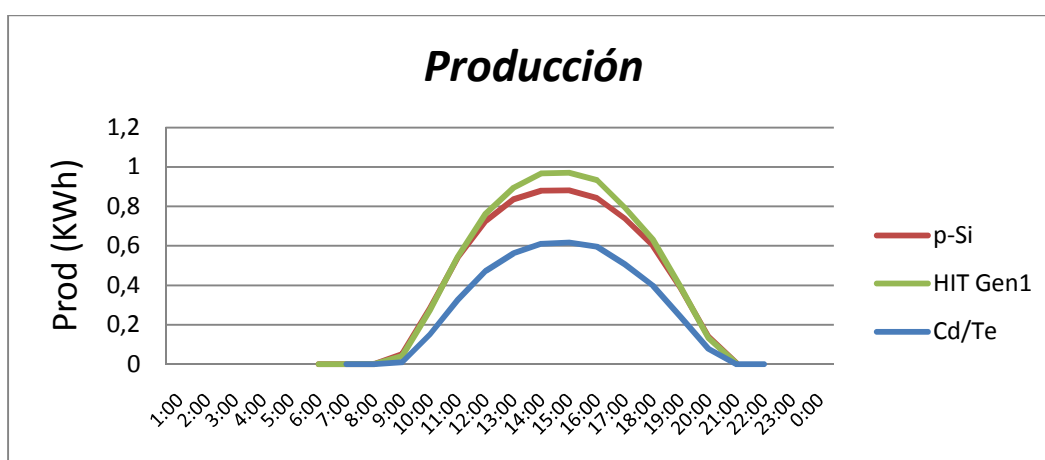


Fig. 5.27: Gráfica de la Producción del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

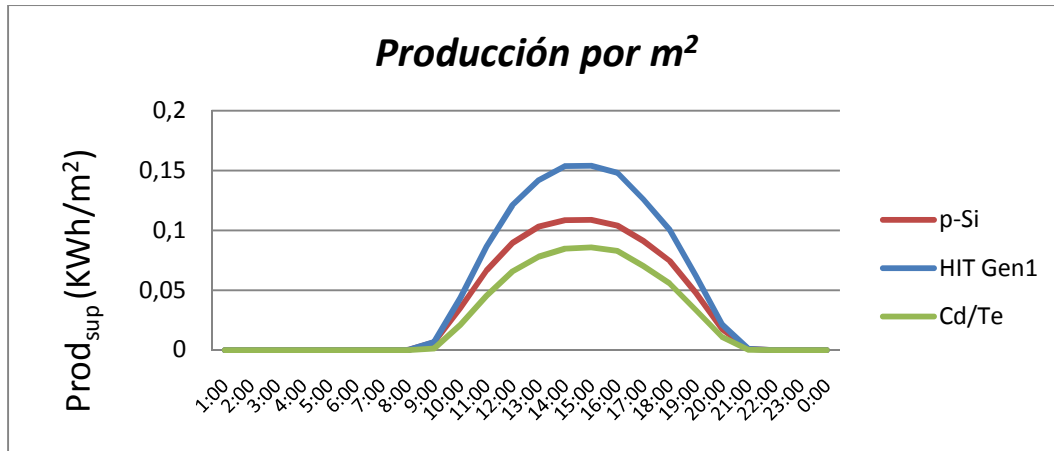


Fig. 5.28: Gráfica de la Producción por m² del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

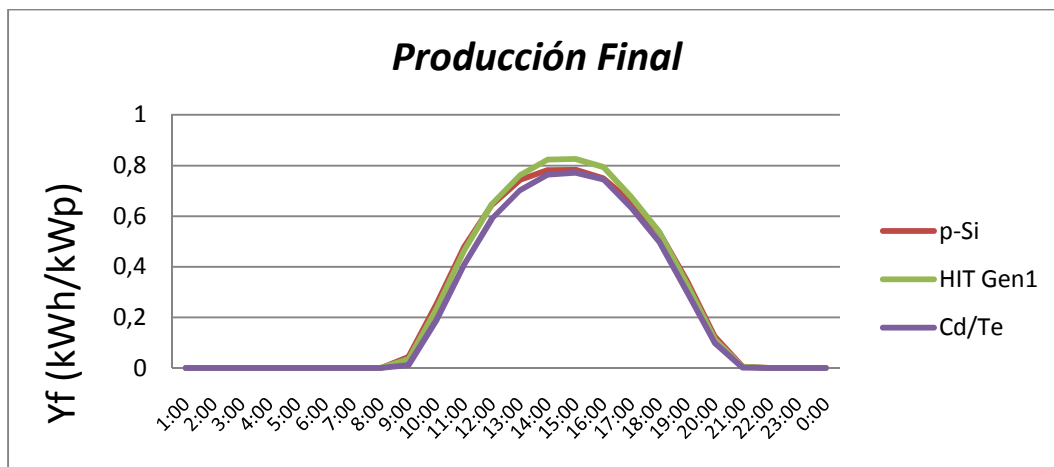


Fig. 5.29: Gráfica de la Producción final del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

En este caso la temperatura ambiente ha bajado bastante respecto a los días anteriores al estar en el mes de Abril, sin embargo vemos que los niveles de irradiancia son similares, pero al estar a menos temperatura los paneles producen más energía respecto a la potencia instalada, lo que vemos en las gráficas de producción final. La tendencia en cuanto a las tecnologías es igual a los casos anteriores, estando en primer lugar en producción la tecnología híbrida HIT, seguida por la de Silicio Policristalino y en último lugar la de Cadmio Teluro.

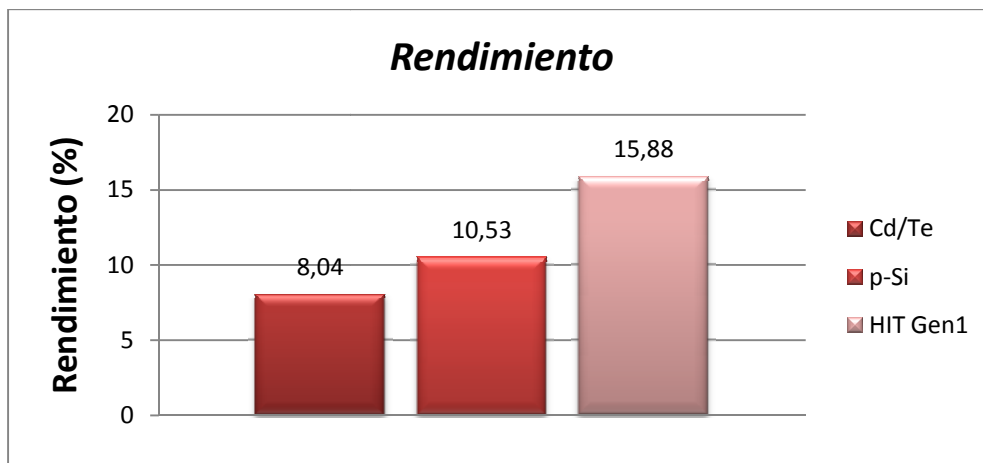


Fig. 5-30: Gráfica del Rendimiento del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

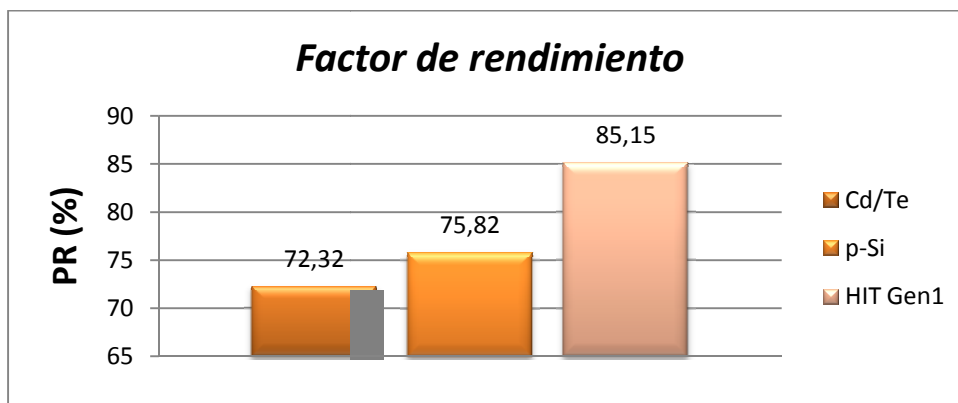


Fig. 5-31: Gráfica del Factor de Rendimiento del 14 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

Vemos que el rendimiento es muy parecido a los casos anteriores, y que el PR a disminuido en los casos de Cd/Te y de Si-P, sin embargo a aumentado en el caso de la tecnología híbrida, lo que nos puede indicar que para temperaturas más bajas la tecnología HIT tiene mejores resultados.

5.1.5. Día Muy soleado, 24 de Julio de 2012:

Datos de la instalación		
Fecha	24 de Julio de 2012	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(C°)	37,63	46,31
Irradiancia (kW/m²)	312,69	517,54

Tabla 5-9: Descripción del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

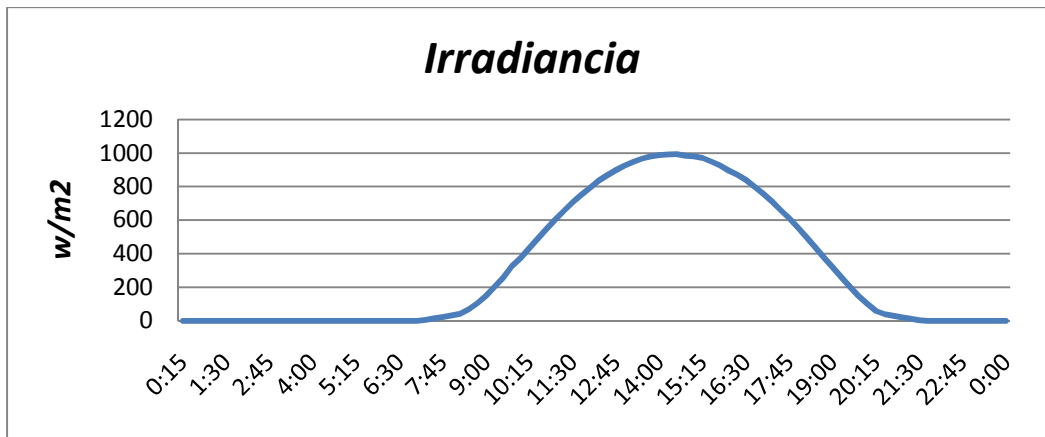


Fig. 5.32: Gráfica de la Irradiancia del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

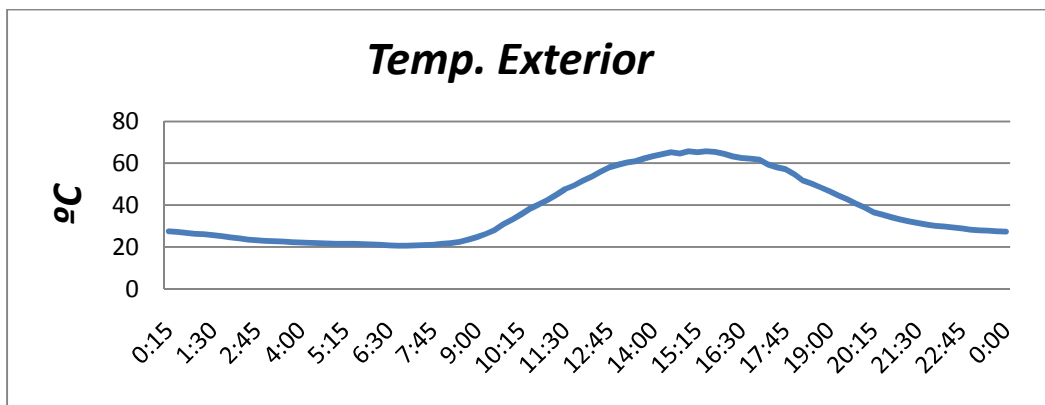


Fig. 5.33: Gráfica de la Temperatura del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

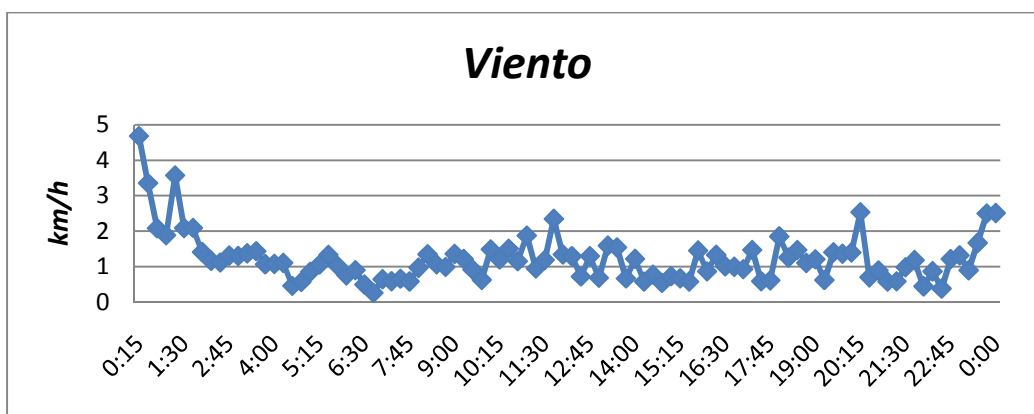


Fig. 5.34: Gráfica del viento del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	14,25	14,25	13,75
Prod (kWh)	4,447	6,496	6,966
Tª.med (.C)	37,24	37,31	36,78
Tª.med horas sol (°C)	46,28	46,33	46,08
Irr med.(W/ m²)	326,54	343,66	307,26
Irr med. h.sol (W/ m²)	540,8	568,81	526,72
Viento medio (Km/h)	1,21		
Viento h. sol (Km/h)	1,09		
Análisis de producción			
P gen (W)	312,07	455,86	506,62
Prod (%)	24,48	35,77	39,75
Yf	5,56	5,77	5,93
Prod sup (kWh/ m²)	0,62	0,80	1,11
Rendimiento (%)	8,01	9,89	15,27
PR (%)	72,13	71,24	81,86

Tabla 5.10: Análisis del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

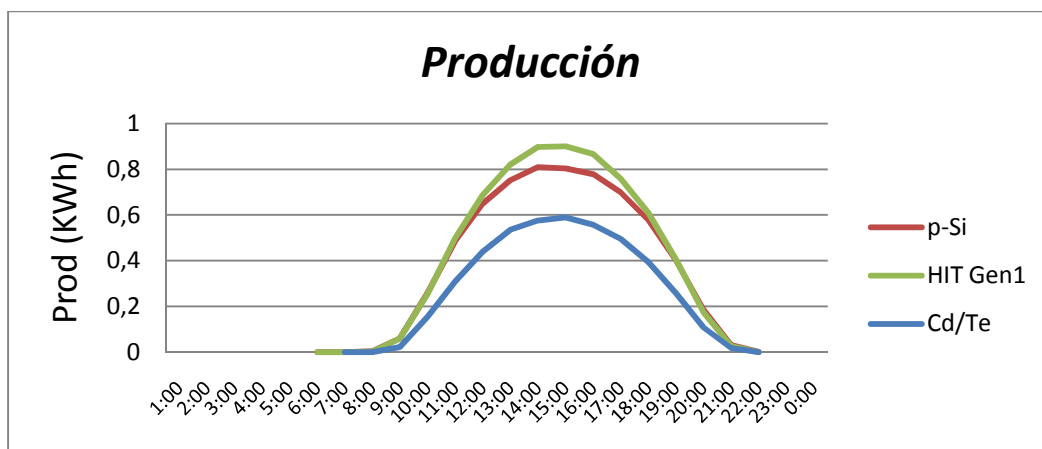


Fig. 5.35: Gráfica de la Producción del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

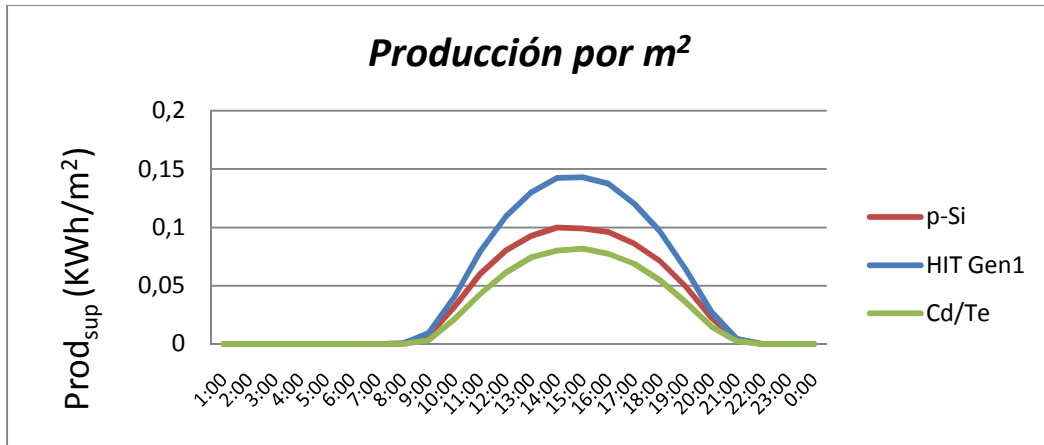


Fig. 5.36: Gráfica de la Producción por m^2 del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

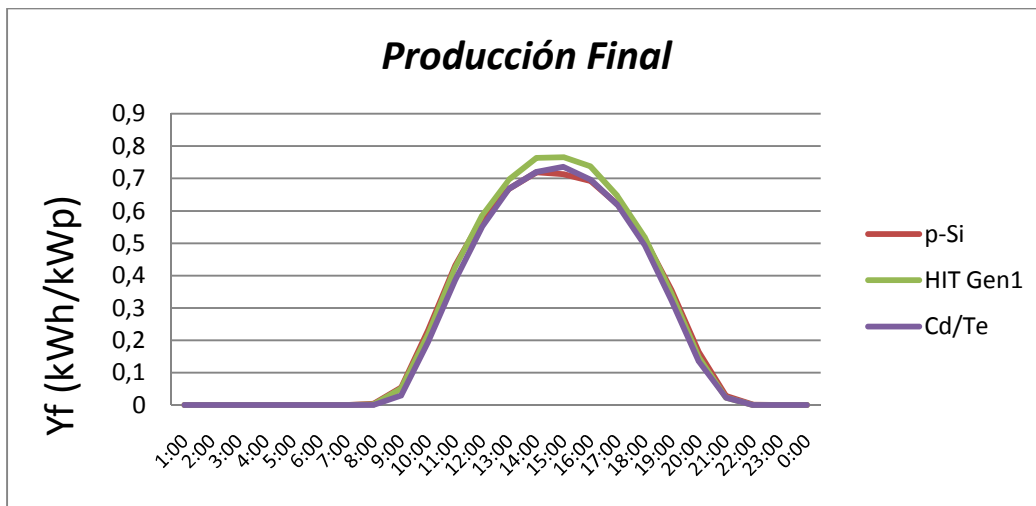


Fig. 5.37: Gráfica de la Producción final del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

El día 24 de Julio ha sido el que más temperatura tiene de los que hemos registrado, lo que marca un descenso en la producción final notable en las tecnologías de Silicio Policristalino así como la tecnología híbrida HIT Gen1, sin embargo la tecnología de Cd/Te apenas ha bajado, lo que nos indica que esta tecnología no se ve tan afectada por los cambios de temperatura. La tendencia que siguen las tecnologías es muy similar a los casos anteriores.

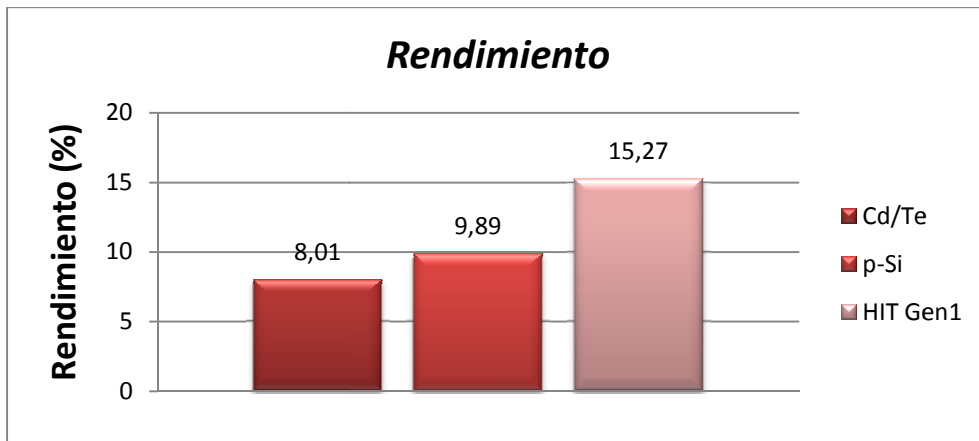


Fig. 5.38: Gráfica del Rendimiento del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

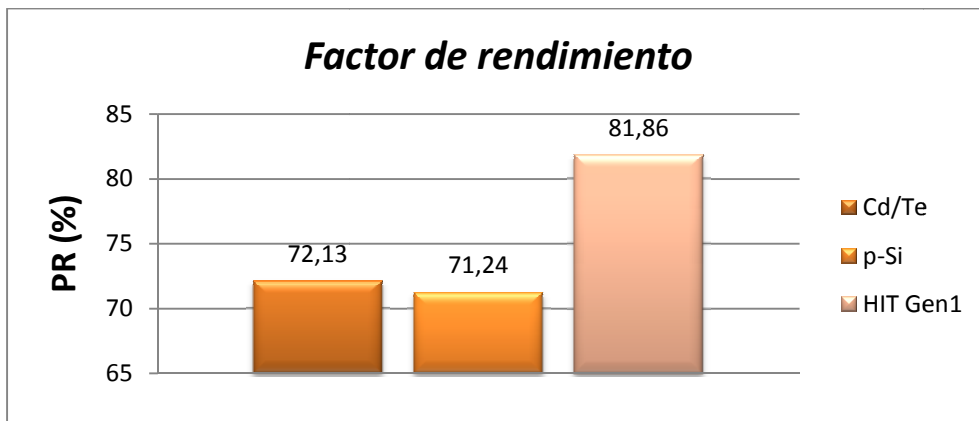


Fig. 5.39: Gráfica del Factor de Rendimiento del 24 de Julio de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Podemos ver en las gráficas que la tecnología de Silicio Policristalino ha bajado mucho su PR, lo que indica que es la que más se ve afectada por el cambio de temperatura, aunque las otras dos han bajado algo su PR, no es un cambio muy significativo. Podemos ver que el rendimiento sigue siendo muy similar a los casos anteriores.

5.1.6. Resumen de días soleados:

Durante los días soleados vemos que al tener unas condiciones de irradiancia muy similares, sin ninguna variación brusca ni condiciones extremas, los datos que obtenemos son muy similares para las tres tecnologías en casi todos los días. Las irradiancias vemos que son variables entre las tecnologías, la estar situados los sensores en diferentes lugares, aunque la irradiancia media suele ser muy similar.

Las temperaturas si son más determinantes, ya que aunque no varían mucho al ser todos los días muy soleados, si que nos han mostrado como la tecnología de Silicio Policristalino y en menos medida la tecnología híbrida, bajan su PR y su potencia entregada en función de la potencia instalada. Podemos ver que la temperatura en los módulos es superior a la temperatura ambiente, especialmente durante las horas de sol.

Vemos en todas las gráficas de producción que la tecnología que más energía aporta a la red es la híbrida HIT Gen1, con unos valores bastante diferenciados de la siguiente que es la tecnología de Silicio Policristalino y seguida por la de Cadmio Teluro.

Esto mismo sucede en el caso de las gráficas de producción por superficie, manteniendo la misma tendencia que en el caso anterior, donde la tecnología híbrida HIT destaca al presentar buenos valores de producción pese a tener poca superficie efectiva de captación, y al igual que antes le sigue la tecnología de Silicio Policristalino y después la de Cadmio Teluro.

Los factores más objetivos para determinar la calidad de las tecnologías son el Rendimiento y el PR:

- Tal y como preveíamos los resultados teóricos y en las especificaciones de cada tipo de tecnología, los valores de rendimiento han respondido de forma muy similar en los resultados experimentales. La tecnología que tiene mejores resultados es la híbrida HIT ya que su valor de rendimiento está en torno al 15 %, seguido por la tecnología de Silicio Policristalino con un rendimiento en torno al 10 % y por último la tecnología de Cadmio Teluro con un rendimiento alrededor del 8%.
- El PR o Performance Ratio es un factor de rendimiento que muestra la idealidad del comportamiento de cada tecnología, y este caso la tecnología híbrida HIT se desmarca de las otras dos a tener un PR en torno al 83 %, lo que la hace una tecnología muy desarrollada y con unos resultados muy buenos. La tecnología de Silicio Policristalino muestra más variabilidad en su PR, al ser una tecnología más que varía más con la temperatura, y está en el rango entre el 71 y 77 %. Por último la tecnología de Cadmio teluro muestra unos valores bastante más bajos que la tecnología HIT, en torno al 73%.

5.2. Análisis de los días nublados:

Continuamos analizando cinco días nublados, elegidos al azar en el portal de SMA Sunny Portal, donde los identificaremos en función de las gráficas de irradiancia que presenten, las cuales se caracterizan por tener picos, ya que los sensores de irradiancia detectan la radiación solar de forma intermitente debido a la alternancia entre claros y nubes que ocultan el sol. En estos días sabemos que el rendimiento de los paneles solares va a ser notablemente inferior al caso de días soleados.

En este caso realizaremos el mismo tipo de análisis que en el apartado anterior, estudiando en un primer momento los datos del día y posteriormente cada tecnología por separado centrándonos en valores de producción, rendimiento y PR mediante las ecuaciones recogidas en el Anexo I.

5.2.1. Día nublado, 17 de Septiembre de 2012:

Datos de la instalación		
Fecha	17 de Septiembre de 2012	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	30.26	37.68
Irradiancia (kW/m²)	187.93	360.82

Tabla 5.11: Descripción del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

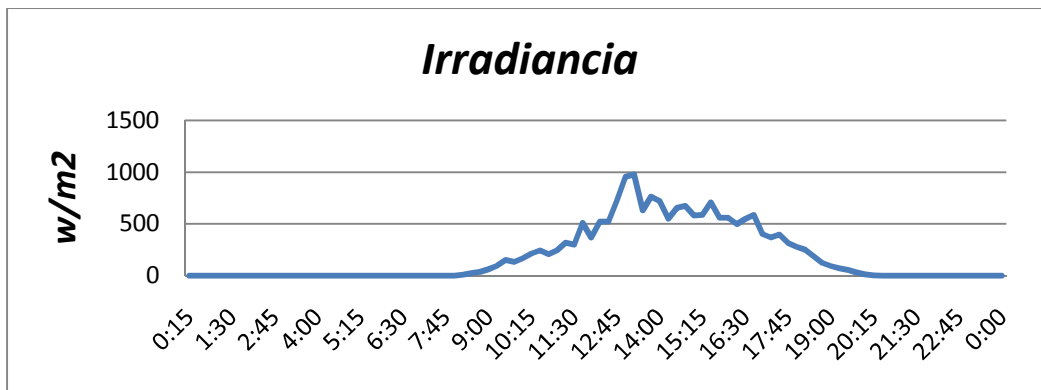


Fig. 5.40: Gráfica de la Irradiancia del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

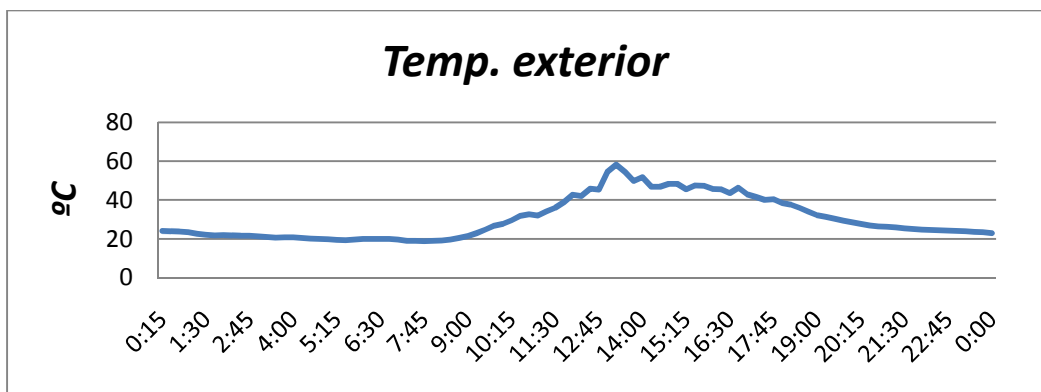


Fig. 5.41: Gráfica de la Temperatura del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.



Fig. 5.42: Gráfica del viento del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	12,25	12	11,75
Prod (kWh)	2,61	4,07	4,23
Tª.med (.C)	29,84	39,11	38,46
Tª.med horas sol (°C)	37,68	52,7	51,74
Irr med.(W/ m²)	198,73	201,13	178,99
Irr med. h.sol (W/ m²)	381,55	394,03	357,98
Viento medio (Km/h)	1,13		
Viento h. sol (Km/h)	1,38		
Análisis de producción			
P gen (W)	213,06	339,17	360,00
Prod (%)	23,36	37,18	39,46
Yf	3,26	3,62	3,60
Prod sup (kWh/ m²)	0,36	0,50	0,67
Rendimiento (%)	7,76	10,63	15,96
PR (%)	69,80	76,51	85,59

Tabla 5.12: Análisis del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

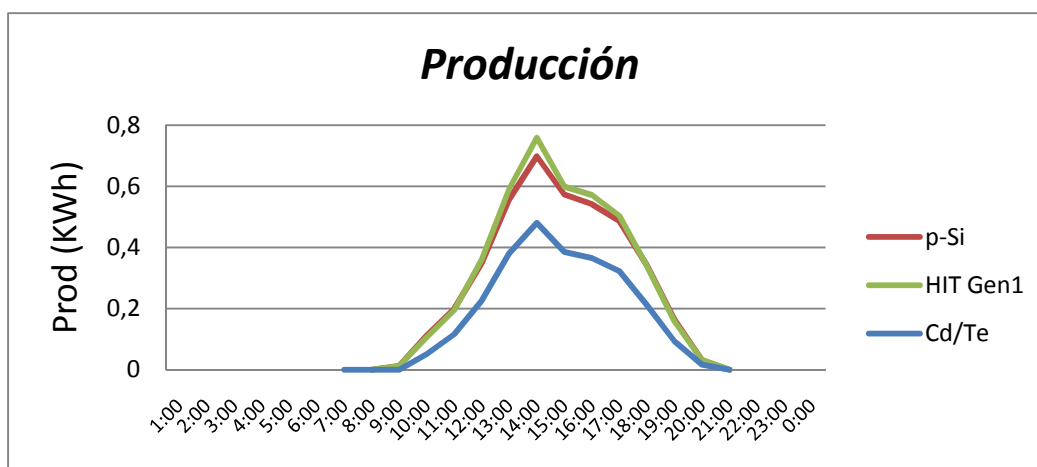


Fig. 5.43: Gráfica de la Producción del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

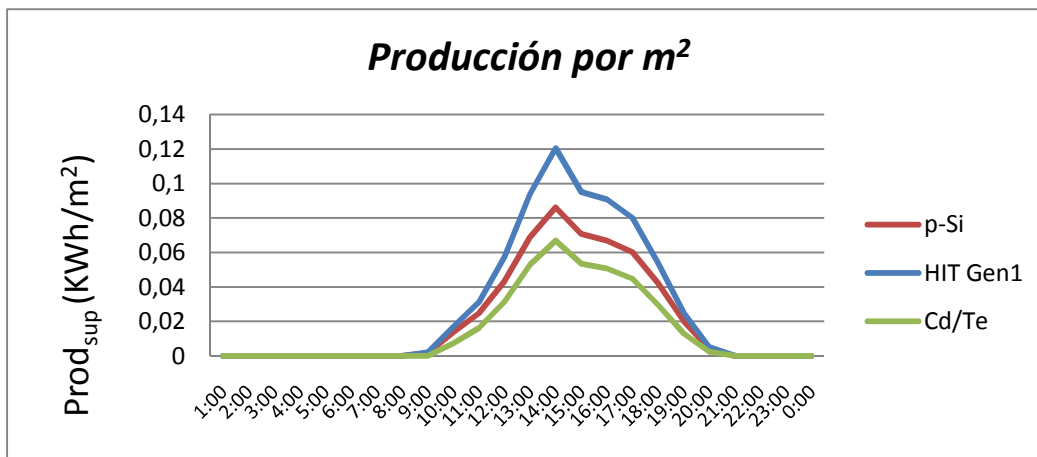


Fig. 5.44: Gráfica de la Producción por m² del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

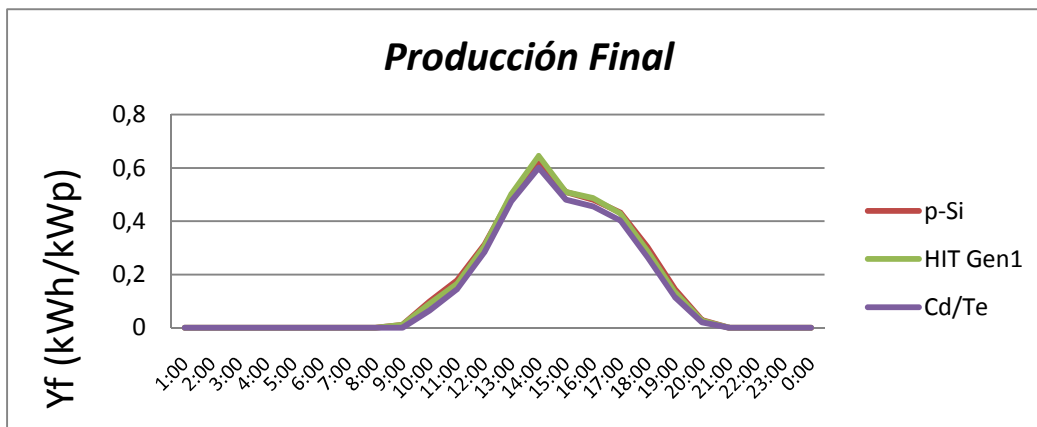


Fig. 5.45: Gráfica de la Producción final del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Para el análisis del primer día nublado de nuestro estudio vemos que los valores medios de irradiancia son mucho menores que en los días soleados, casi la mitad, aunque lo más relevante es la irregularidad de la gráfica de irradiancia, ya que hay puntos en los que alcanza valores entorno a los 1000W/m² y otros muy próximos a los anteriores en los que apenas llega a 500 W/m². Esto se debe a que al ser días nublados, pueden serlo completamente o tener claros esporádicos, y además esto afecta a la temperatura donde vemos que la gráfica también es mucho mas variable que en los días soleados.

Podemos comprobar que para un día nublado de Septiembre la producción es aproximadamente un 30% menor que para un día soleado del mismo mes analizado anteriormente. Las tecnologías siguen la misma tendencia que en los días soleados, siendo la tecnología híbrida HIT Gen1 la que más energía produce, pero en este caso es seguida muy de cerca por la tecnología de Silicio Policristalino. En último lugar se encuentra la tecnología de Cadmio Teluro bastante por debajo de las otras dos.

En cuanto a la producción en función a la superficie de captación las tecnologías siguen un esquema muy similar al de los días soleados, estando por encima el generador híbrido, seguido por el de Silicio Policristalino y posteriormente por el de Cadmio Teluro.

Al igual que en los casos anteriores, la producción en función a la potencia pico instalada es prácticamente igual en todas las tecnologías, lo que indica un buen dimensionamiento, y una buena respuesta de cada tecnología en función de la potencia nominal de cada panel.

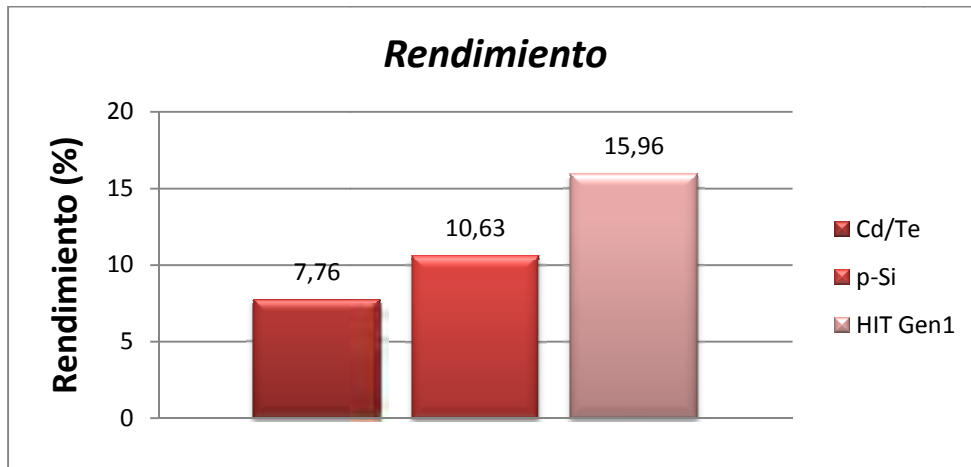


Fig. 5.46: Gráfica del Rendimiento del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

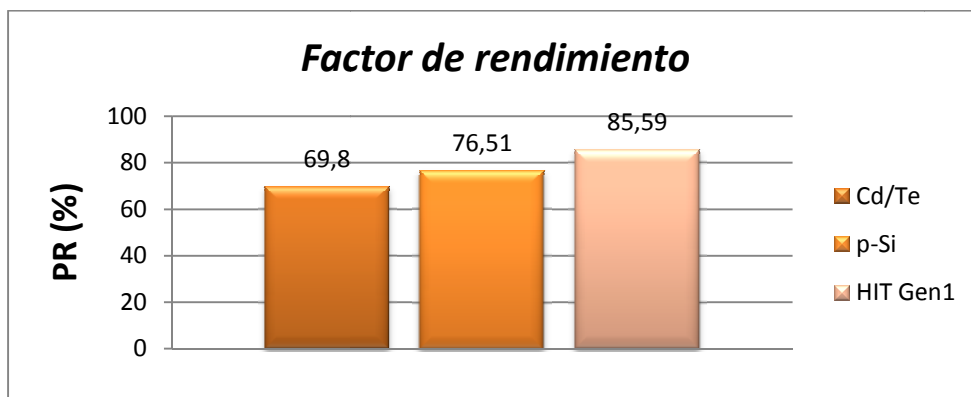


Fig. 5.47: Gráfica del Factor de Rendimiento del 17 de Septiembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

En cuanto al rendimiento y el factor de rendimiento PR podemos ver que apenas varía respecto a los casos anteriores de días soleados, manteniéndose la tecnología híbrida HIT muy por encima tanto en rendimiento como en PR, seguida por la tecnología de Silicio Policristalino y por la tecnología de Cadmio Teluro en último lugar.

5.2.2. Día nublado, 3 de Noviembre de 2012:

Datos de la instalación		
Fecha	3 de Noviembre de 2012	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	15.5	18.5
Irradiancia (kW/m²)	46.27	111.05

Tabla 5.13: Descripción del 3 de Noviembre de 2013. Fuente: SunnyPortal.

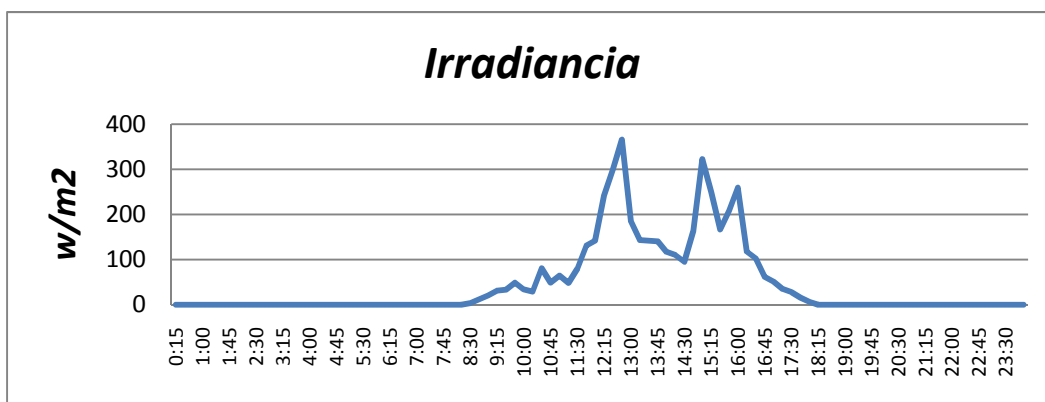


Fig. 5.48: Gráfica de la Irradiancia del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

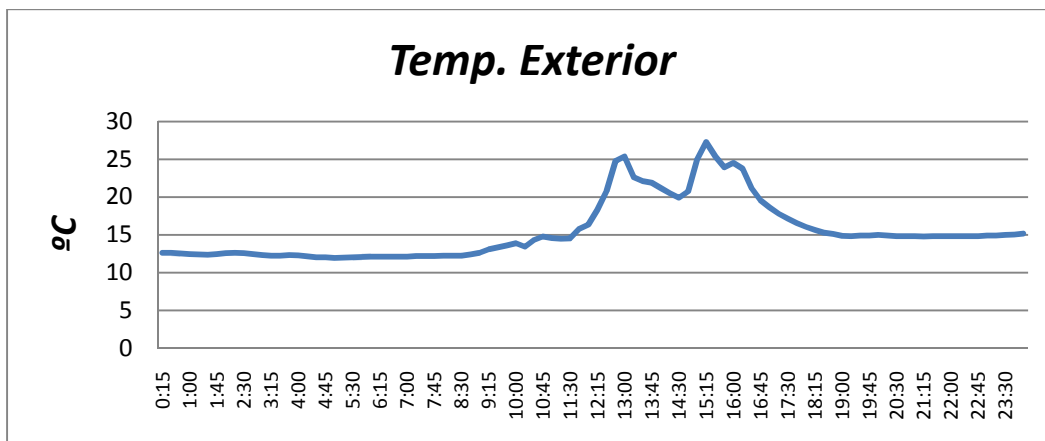


Fig. 5.49: Gráfica de la Temperatura del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

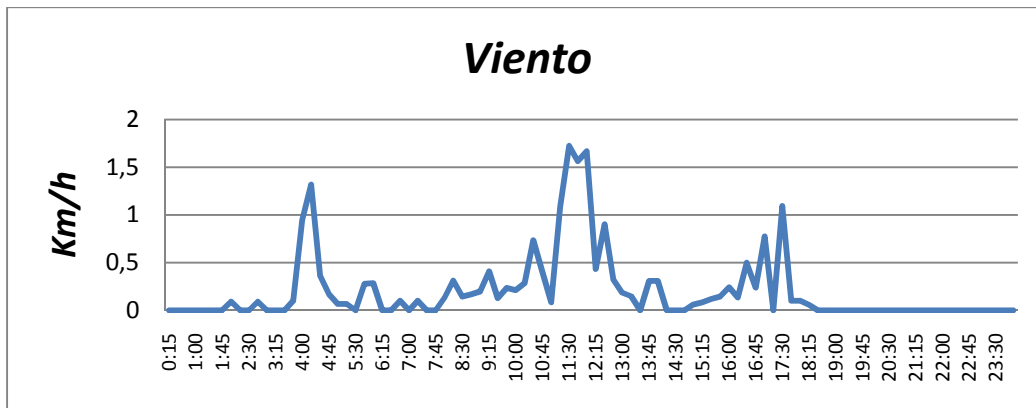


Fig. 5.50: Gráfica del viento del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	9,75	10	9,5
Prod (kWh)	0,559	0,994	0,951
Tª.med (.C)	13,66	13,55	13,95
Tª.med horas sol (°C)	16,77	16,33	17,05
Irr med.(W/ m²)	49,01	52,01	41,84
Irr med. h.sol (W/ m²)	117,34	120,68	108,53
Viento medio (Km/h)	0,205		
Viento h. sol (Km/h)	0,382		
Análisis de producción			
P gen (W)	57,33	99,40	100,11
Prod (%)	22,32	38,70	38,98
Yf	0,70	0,88	0,81
Prod sup (kWh/ m²)	0,08	0,12	0,15
Rendimiento (%)	6,79	10,17	14,64
PR (%)	61,08	73,21	78,50

Tabla 5.14: Análisis del 3 de Noviembre de 2013. Fuente: SunnyPortal.

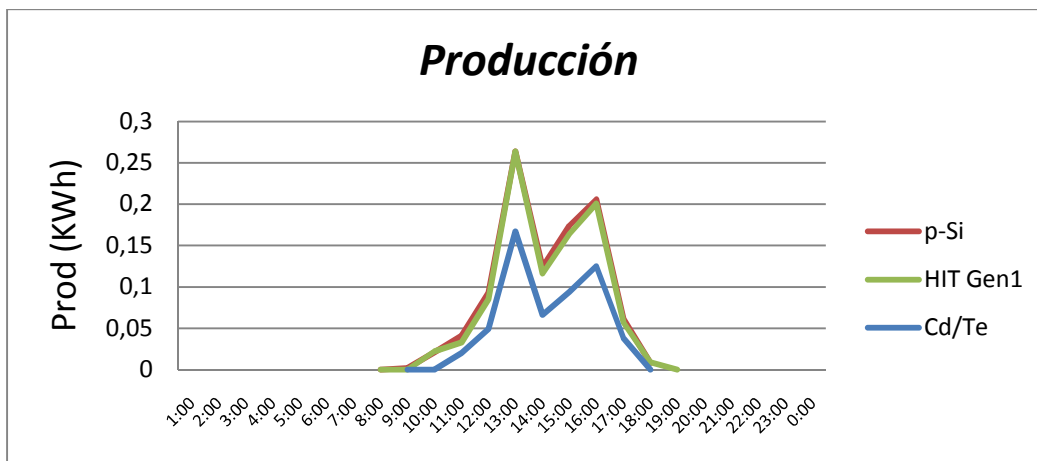


Fig. 5.51: Gráfica de la Producción del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

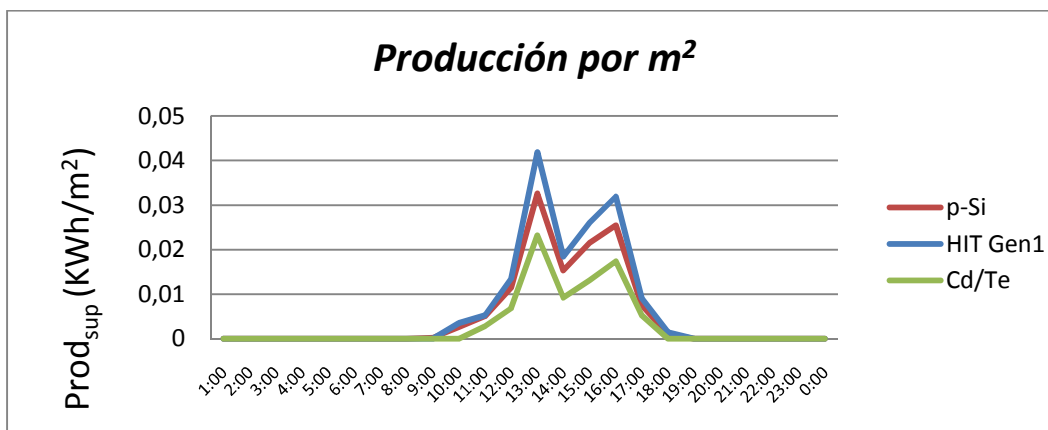


Fig. 5.52: Gráfica de la Producción por m² del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

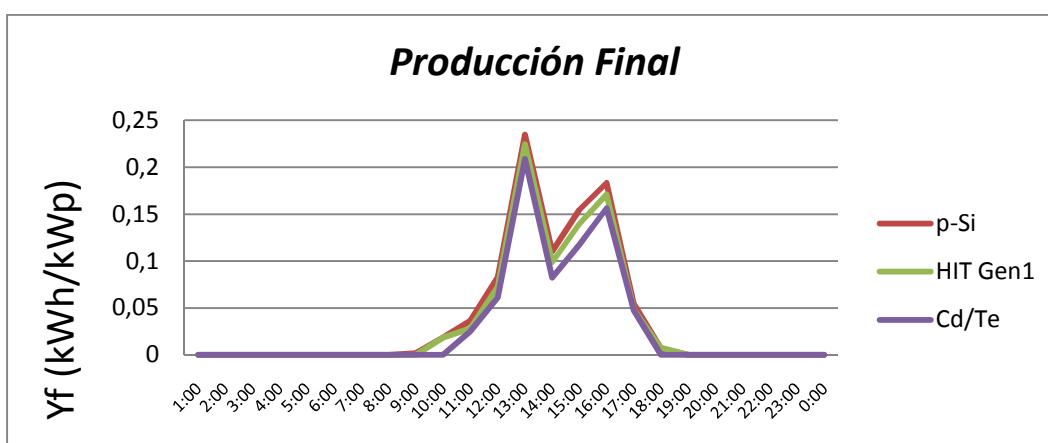


Fig. 5.53: Gráfica de la Producción final del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

En el segundo día de estudio de días nublados correspondiente al día 3 de Noviembre de 2013 donde recogemos los datos más bajos de irradiancia. Mediante las gráficas podemos ver que el día ha sido muy nublado con algún claro muy ocasional. Las temperaturas también han sido muy bajas, lo que era de esperar al ser la irradiancia tan baja. Para este día vemos que la tecnología de Silicio Policristalino iguala a la híbrida HIT en energía producida e incluso la aventaja en energía producida por unidad de potencia instalada, lo que demuestra que se ve menos perjudicada en caso de malas condiciones de irradiancia y temperatura.

En cuanto a la producción por superficie, la tendencia sigue siendo la misma que en casos anteriores.

La tecnología de Cadmio Teluro sigue estando por debajo de las otras dos.

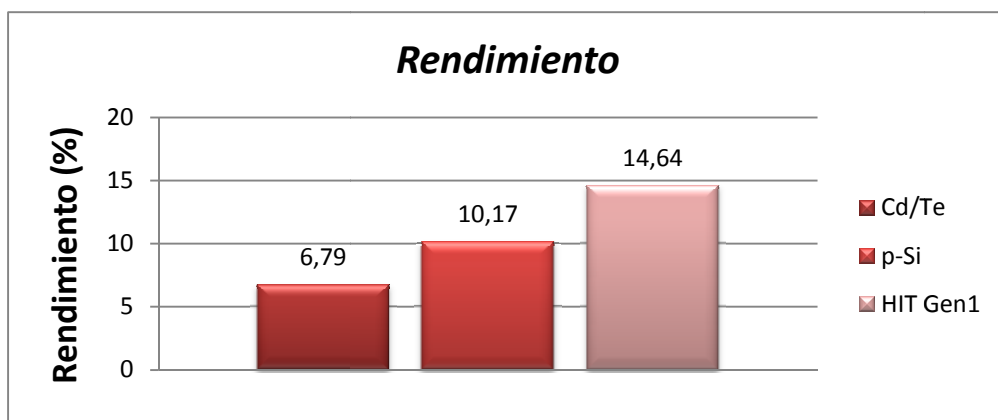


Fig. 5.54: Gráfica del Rendimiento del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

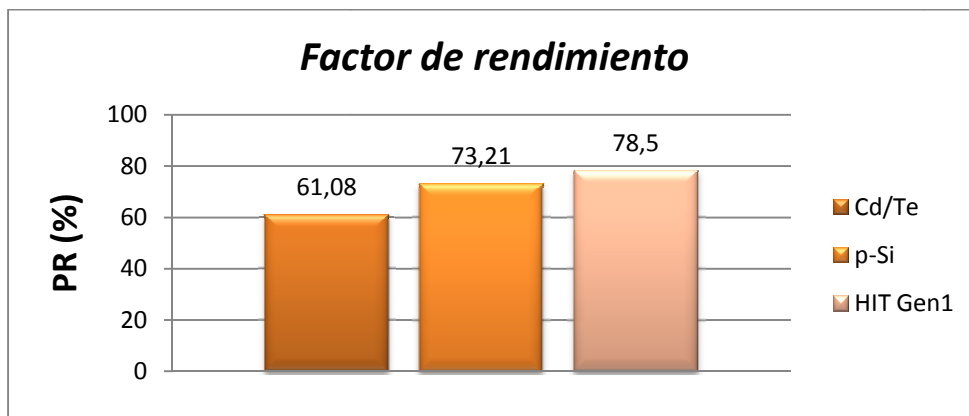


Fig. 5.55: Gráfica del Factor de Rendimiento del 3 de Noviembre de 2012. Fuente: SunnyPortal.

En cuanto al rendimiento y el factor PR, vemos que las tecnologías siguen comportándose de manera similar, sin embargo la diferencia que había entre la tecnología HIT y la de Silicio Policristalino se ha reducido, por lo tanto volvemos a ver que en malas condiciones la tecnología de Silicio Policristalino es menos perjudicada que las otras dos tecnologías.

5.2.3. Día Muy nublado, 17 de Enero de 2013:

Datos de la instalación		
Fecha	17 de Enero de 2013	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	12,78	17,35
Irradiancia (kW/m²)	99,14	244,01

Tabla 5.15: Descripción del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

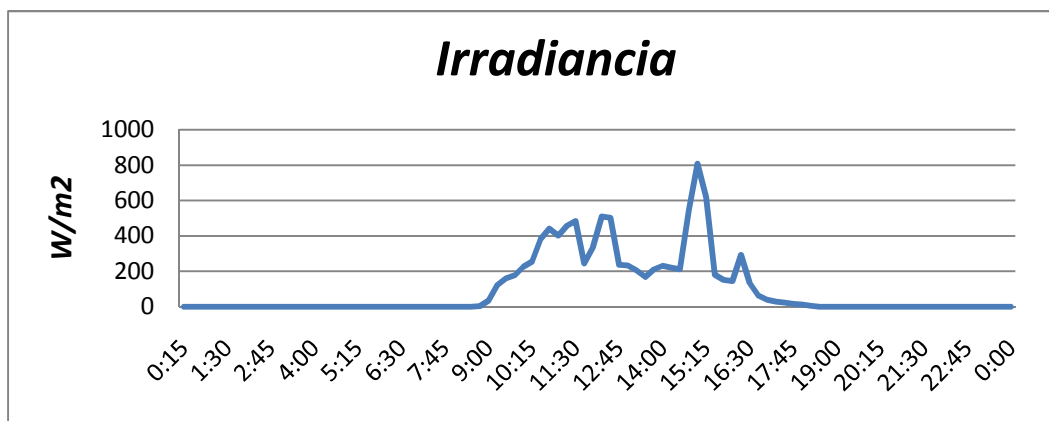


Fig. 5.56: Gráfica de la Irradiancia del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

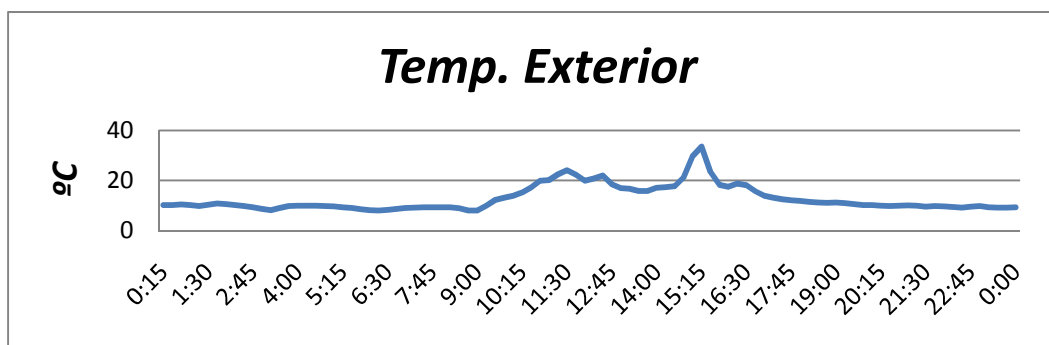


Fig. 5.57: Gráfica de la Temperatura del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

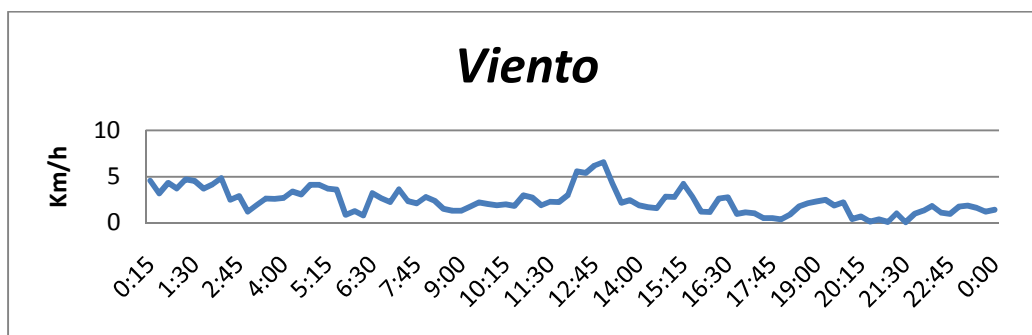


Fig. 5.58: Gráfica del viento del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	9,5	9,5	9,5
Prod (kWh)	1,326	2,335	2,357
Tª.med (.C)	10,93	10,33	10,88
Tª.med horas sol (°C)	15,9	14,7	16,15
Irr med.(W/ m²)	97,86	94,73	84,51
Irr med. h.sol (W/ m²)	240,31	232,67	219,27
Viento medio (Km/h)	2,35		
Viento h. sol (Km/h)	2,4		
Análisis de producción			
P gen (W)	139,58	245,79	248,11
Prod (%)	22,03	38,80	39,17
Yf	1,66	2,08	2,01
Prod sup (kWh/ m²)	0,18	0,29	0,37
Rendimiento (%)	8,07	13,04	17,96
PR (%)	72,60	93,90	96,30

Tabla 5.16: Análisis del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

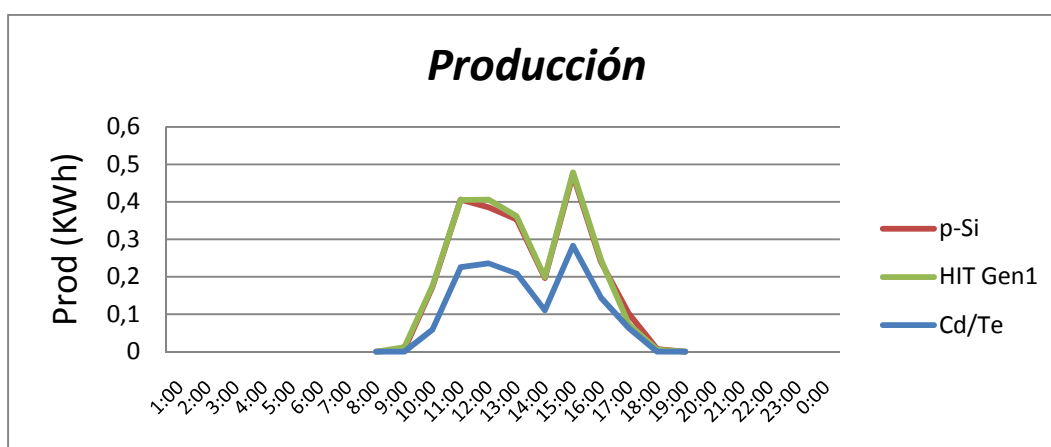


Fig. 5.59: Gráfica de la Producción del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

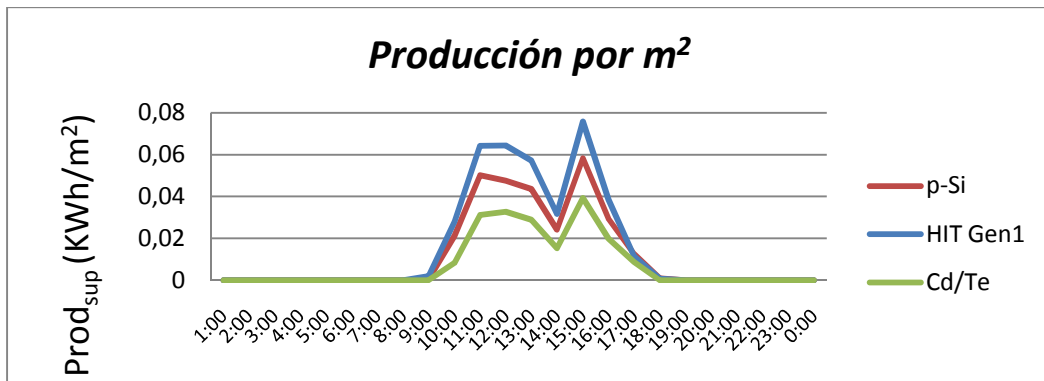


Fig. 5.60: Gráfica de la Producción por m² del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

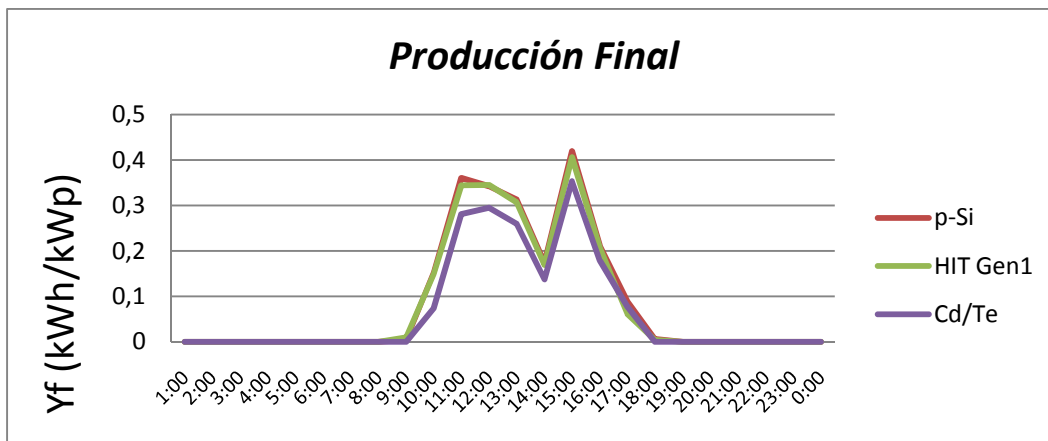


Fig. 5.61: Gráfica de la Producción final del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

Para el 17 de Enero de 2013 vemos muy buenos resultados, lo que se puede deber a las bajas temperaturas, y una irradiancia superior al día anterior. La producción tiene unos valores más elevados que el día anterior y como ya hemos podido comprobar a bajas temperaturas las tecnologías HIT y de Silicio Policristalino tienen valores muy similares. En cuanto a la producción según la superficie la tecnología híbrida HIT sigue siendo mejor que la de Silicio Policristalino y esta a su vez mejor que la de Cadmio telurio.

En la producción final vemos que la tecnología de cadmio telurio es un poco más baja que las otras dos, lo que puede indicar que ha bajas temperaturas empeora ligeramente sus propiedades.

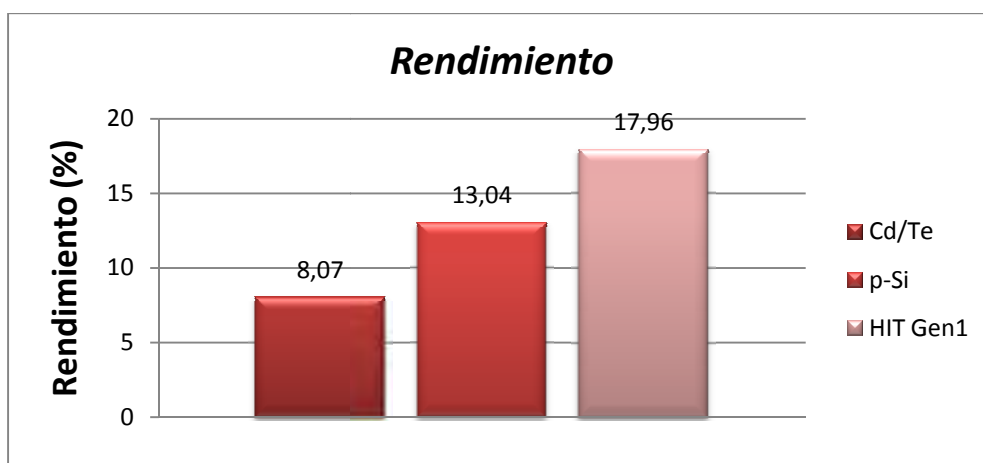


Fig. 5.62: Gráfica del Rendimiento del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

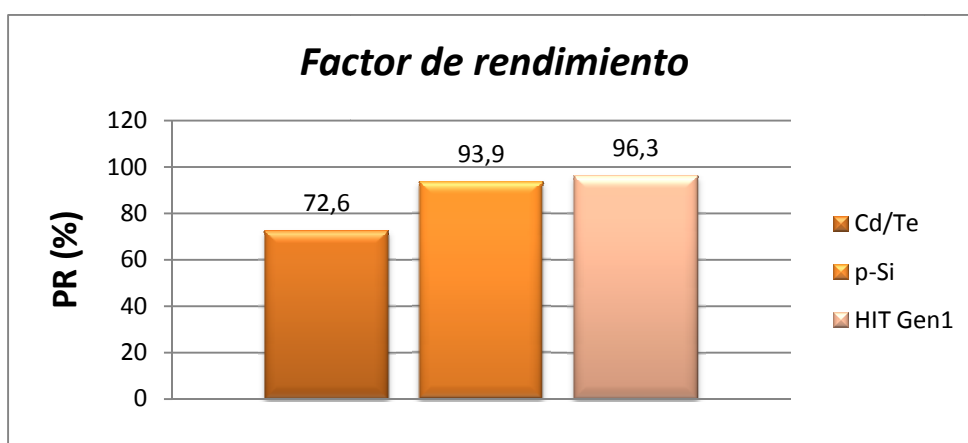


Fig. 5.63: Gráfica del Factor de Rendimiento del 17 de Enero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

En cuanto al rendimiento vemos que la tendencia es muy similar a los casos anteriores, sin embargo vemos un aumento muy notable en el factor de rendimiento PR en todas las tecnologías. Especialmente en la tecnología de Silicio cristalino, lo que nos indica que es muy favorable una disminución de la temperatura para que los paneles mejoren sus propiedades.

5.2.4. Día Muy nublado, 10 de Febrero de 2013:

Datos de la instalación		
Fecha	10 de Febrero de 2013	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	7,91	13,75
Irradiancia (kW/m²)	132,85	296,6

Tabla 5.17: Descripción del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

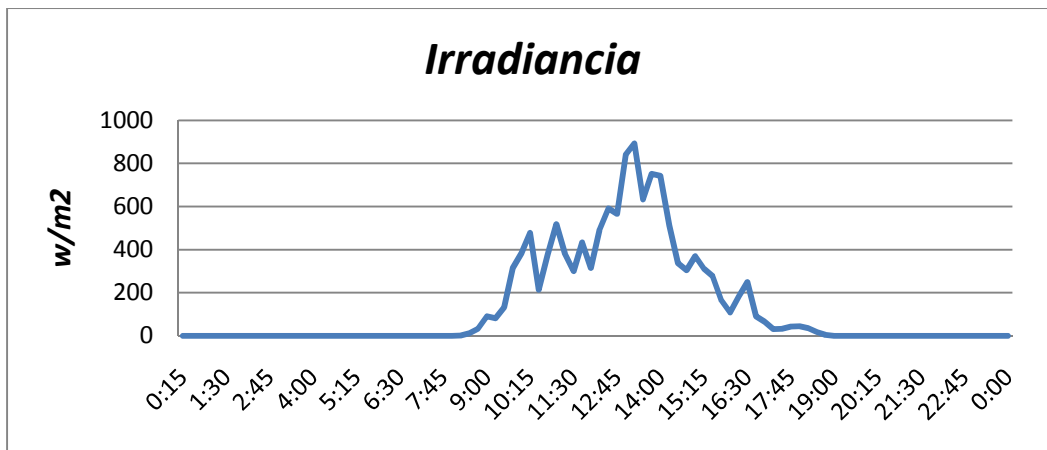


Fig. 5.64: Gráfica de la Irradiancia del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

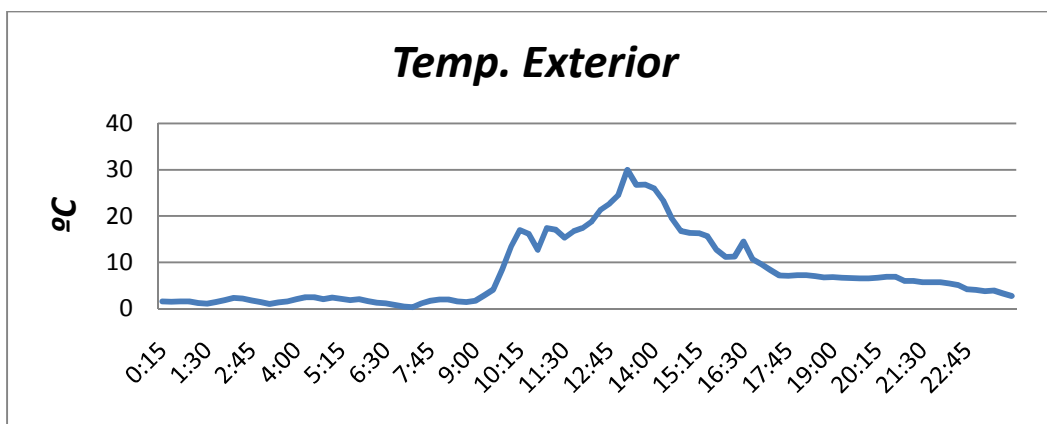


Fig. 5.65: Gráfica de la Temperatura del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

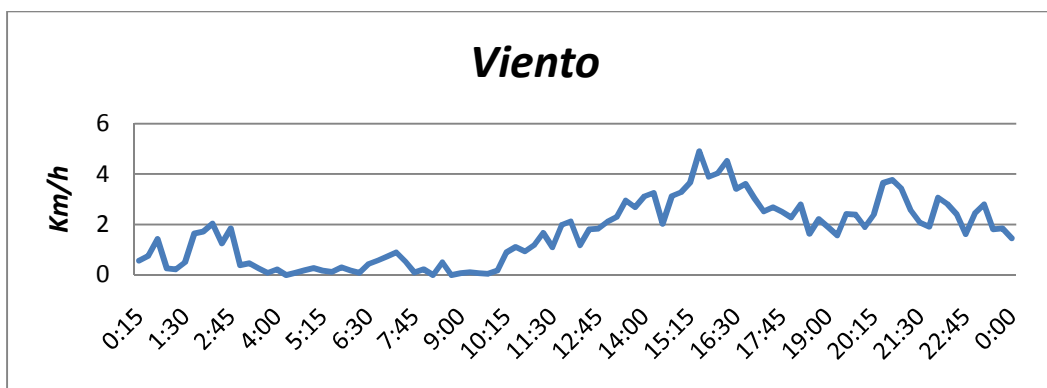


Fig. 5.66: Gráfica del viento del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	10,75	10,5	10,25
Prod (kWh)	1,85	3,13	3,26
Tª.med (.C)	7,58	7,21	7,72
Tª.med horas sol (°C)	13,68	12,92	13,82
Irr med.(W/ m²)	135,28	133,67	121,07
Irr med. h.sol (W/ m²)	300	297,26	276,73
Viento medio (Km/h)	1,65		
Viento h. sol (Km/h)	2,08		
Análisis de producción			
P gen (W)	172,09	298,10	318,05
Prod (%)	21,83	37,82	40,35
Yf	2,31	2,78	2,77
Prod sup (kWh/ m²)	0,26	0,39	0,52
Rendimiento (%)	7,97	12,38	18,24
PR (%)	71,71	89,14	97,81

Tabla 5.18: Análisis del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

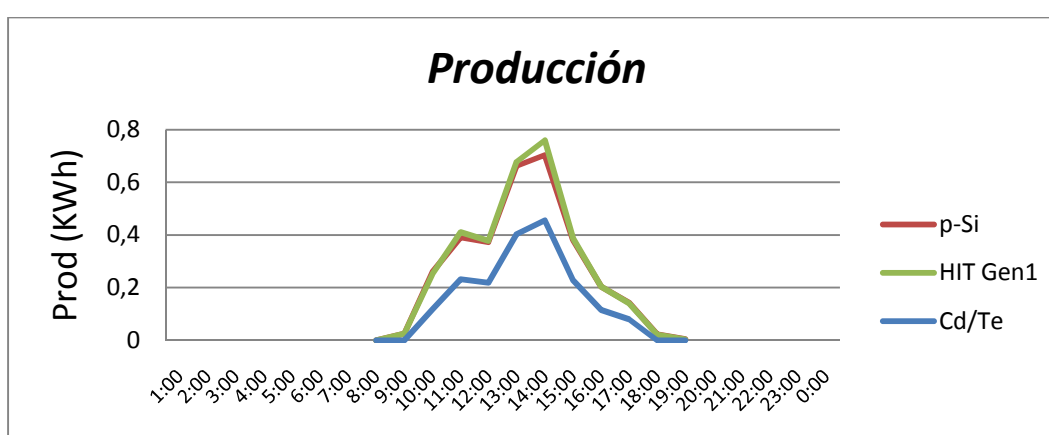


Fig. 5.67: Gráfica de la Producción del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

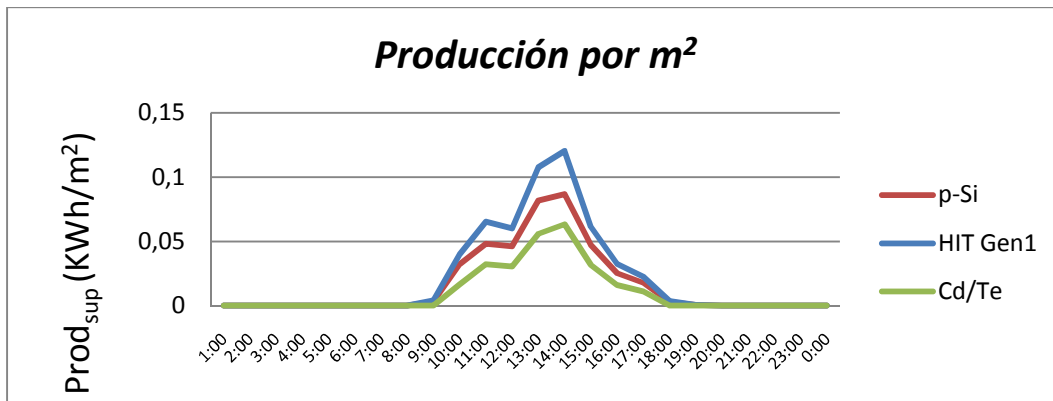


Fig. 5.68: Gráfica de la Producción por m^2 del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

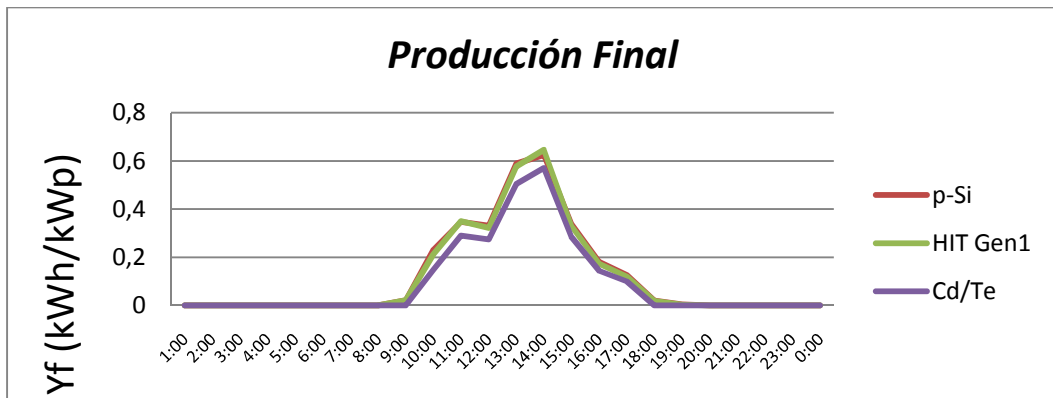


Fig. 5.69: Gráfica de la Producción final del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

El 10 de Febrero de 2012 tenemos temperaturas aun más bajas que el día anterior pero el valor de la irradiancia ha sido mayor, por lo que los niveles de producción también han subido, manteniéndose una igualdad entre la tecnología HIT y la de Silicio Policristalino, dejando más abajo a la tecnología de Cadmio Teluro.

En cuanto a la producción según la superficie la tecnología híbrida HIT sigue siendo mejor que las otras dos.

En la producción final vemos que aunque está muy igualadas la tecnología de Cadmio Teluro se comporta algo peor (respecto a las otras dos) que en los días soleados.

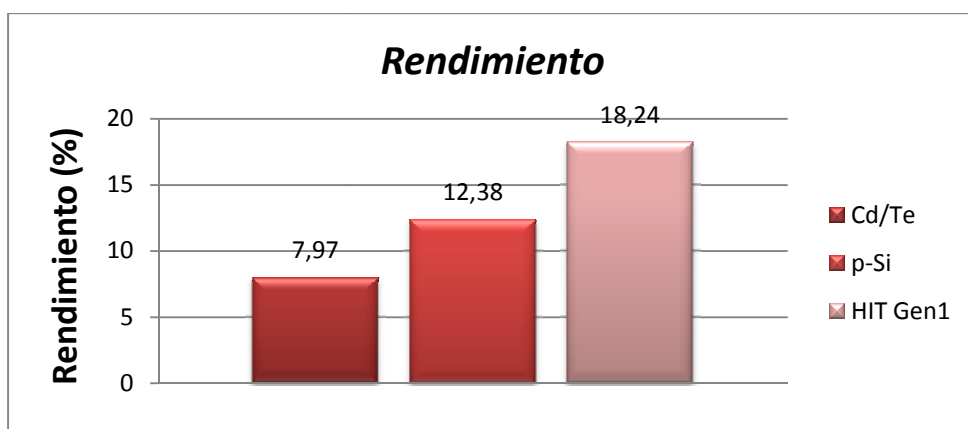


Fig. 5.70: Gráfica del Rendimiento del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

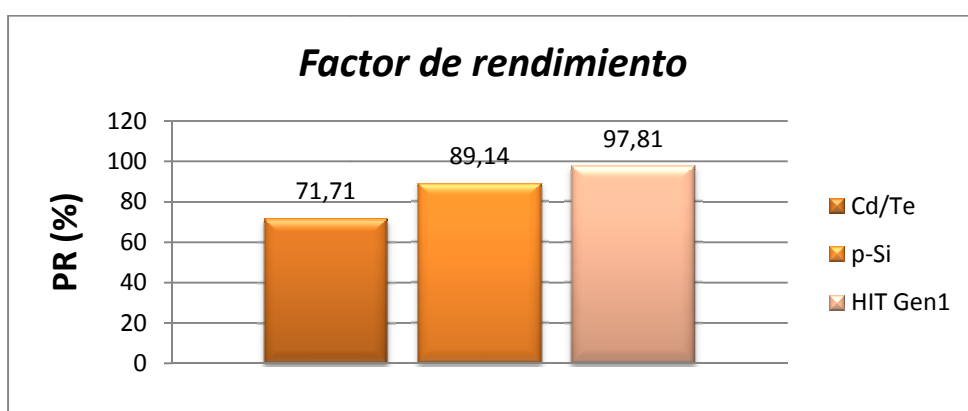


Fig. 5.71: Gráfica del Factor de Rendimiento del 10 de Febrero de 2013. Fuente: SunnyPortal.

Vemos que al aumentar la irradiancia la tecnología híbrida HIT vuelve a separarse de las otras dos tanto en rendimiento como en factor de rendimiento PR, aunque al haber bajas temperaturas las otras dos tecnologías también presentan muy buenos resultados.

5.2.5. Día muy nublado, 3 de Abril de 2013:

Datos de la instalación		
Fecha	3 de Abril de 2013	
Producción total		
Condiciones Atmosféricas		
	Media diaria	Media horas de sol
Temperatura ambiente(Cº)	13,6	19,43
Irradiancia (kW/m²)	134,16	247,68

Tabla 5.19: Descripción del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

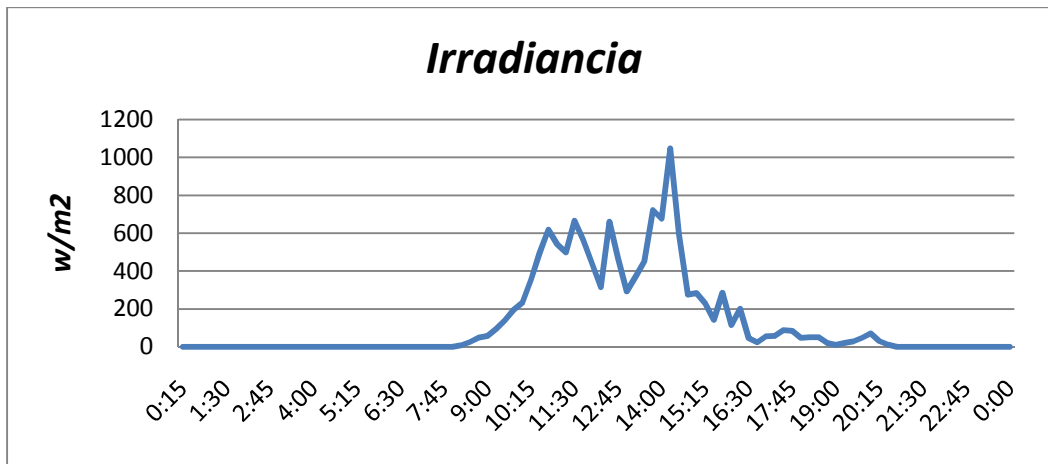


Fig. 5-72: Gráfica de la Irradiancia del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

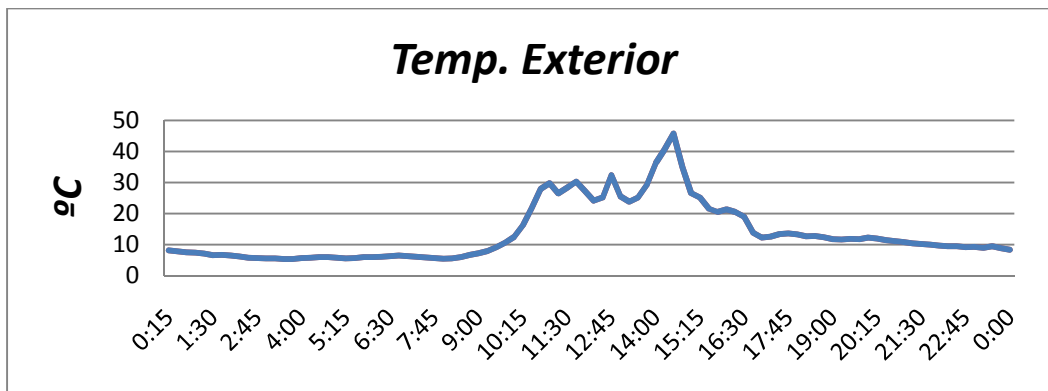


Fig. 5-73: Gráfica de la Temperatura del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

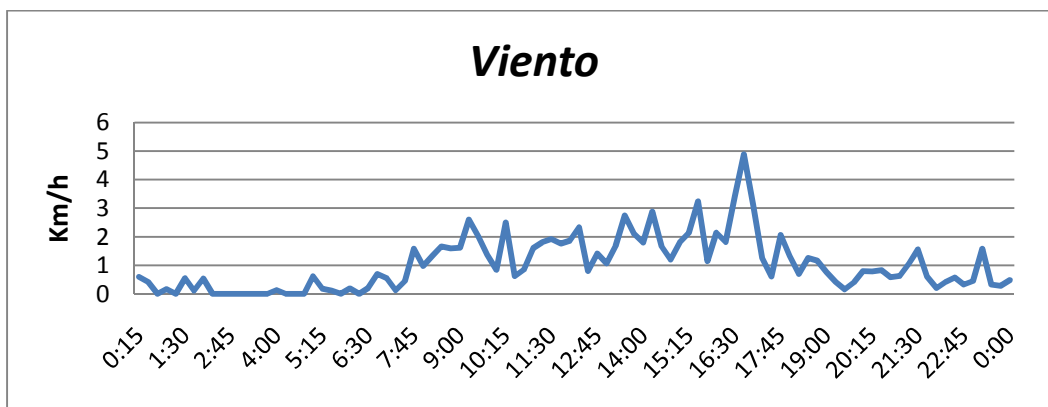


Fig. 5-74: Gráfica del viento del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

Calculo experimental por tecnologías			
Tipo	Cd/Te	p-Si	HIT Gen1
Datos de la instalación			
Sgen(m2)	7,2	8,1	6,3
P.Ins.(W)	800	1125	1175
P.Ins.(kW)	0,8	1,125	1,175
% P sobre el total	25,81	36,29	37,90
Datos obtenidos mediante Sunny Portal			
H de sol (horas)	12,75	12,5	12
Prod (kWh)	1,817	3,085	3,15
Tª.med (.C)	11,68	11,48	11,59
Tª.med horas sol (°C)	17,85	17,5	17,71
Irr med.(W/ m²)	137,11	141,58	123,55
Irr med. h.sol (W/ m²)	252,331	265,98	242,05
Viento medio (Km/h)	1,034		
Viento h. sol (Km/h)	1,64		
Análisis de producción			
P gen (W)	142,51	246,80	262,50
Prod (%)	21,86	37,86	40,27
Yf	2,27	2,74	2,68
Prod sup (kWh/ m²)	0,25	0,38	0,50
Rendimiento (%)	7,84	11,46	17,21
PR (%)	70,60	82,48	92,30

Tabla 5.20: Análisis del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

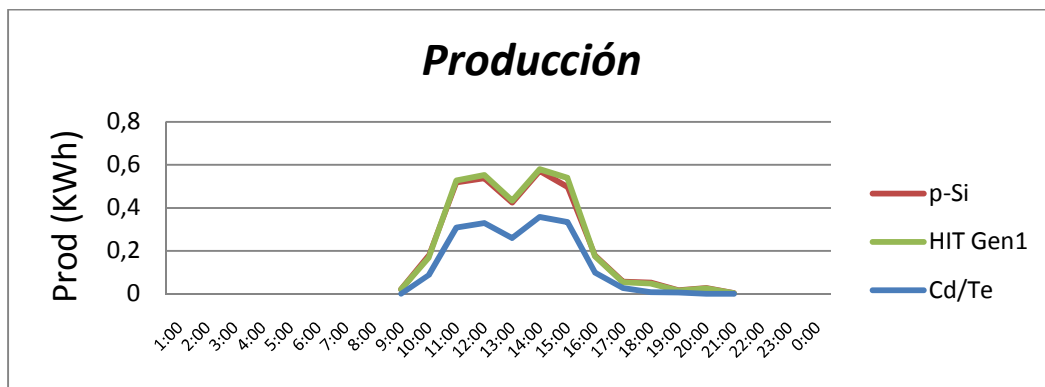


Fig. 5.75: Gráfica de la Producción del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

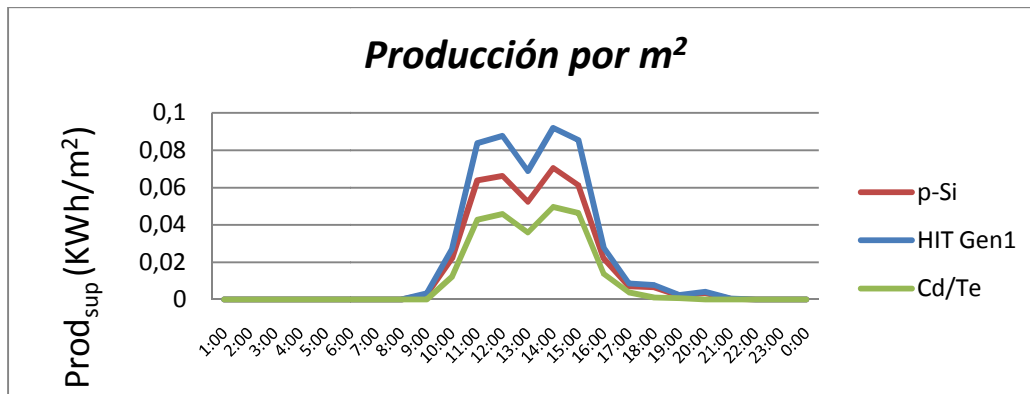


Fig. 5.76: Gráfica de la Producción por m² del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

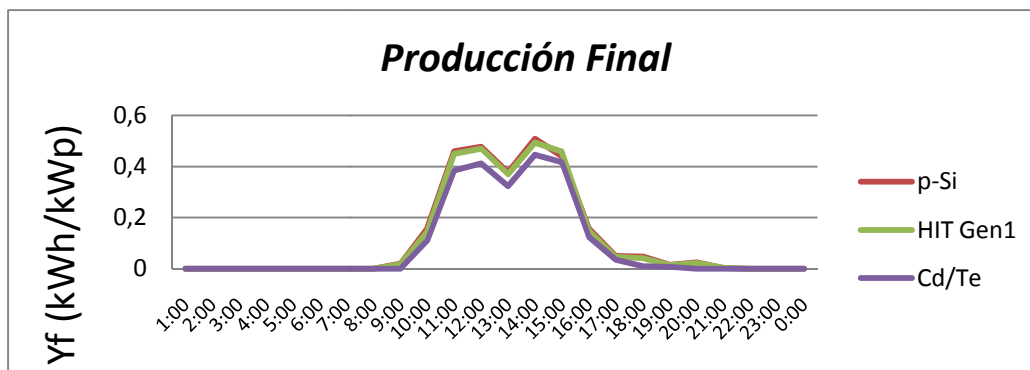


Fig. 5.77: Gráfica de la Producción final del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

Podemos ver que los valores de temperatura e irradiancia son similares al día anterior, por lo que se sigue la misma tendencia en las tres comparaciones, siendo la tecnología híbrida HIT y la de Silicio Policristalino muy iguales en cuanto a producción y producción en función de la potencia instalada, y siendo algo mejor la tecnología HIT en cuanto a potencia según la superficie de los paneles. La tecnología de Cadmio Teluro continúa siendo la que presenta peores propiedades de las tres, aunque está muy cerca de las otras en producción final.

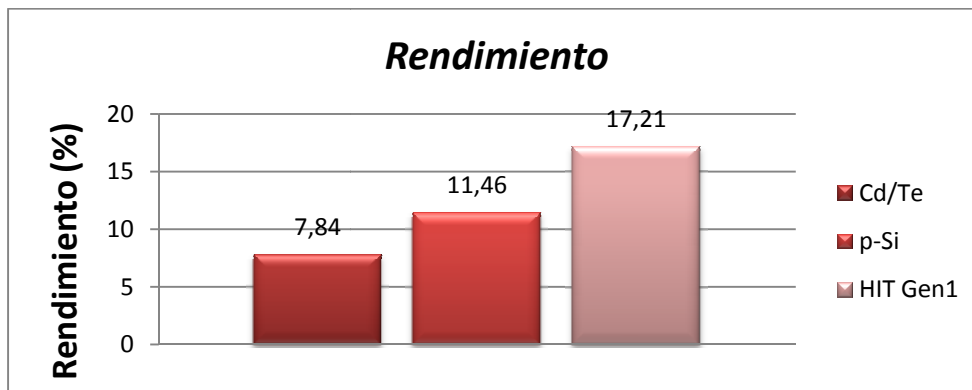


Fig. 5.78: Gráfica del Rendimiento del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

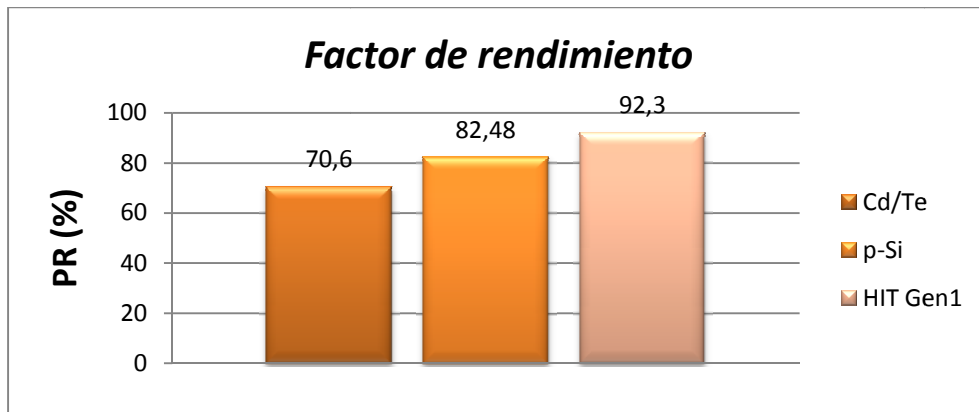


Fig. 5-79: Gráfica del Factor de Rendimiento del 3 de Abril de 2013. Fuente: SunnyPortal.

A igual que el día anterior la mejor tecnología es la híbrida tanto en rendimiento como en PR, seguida de la tecnología de Silicio Policristalino y después por la de Cadmio Teluro. Podemos ver que la tecnología HIT híbrida es la menos variable en todo el estudio, destacando también que la tecnología de Silicio Policristalino está muy cerca en situaciones de baja temperatura y poca irradiancia.

5.2.6. Resumen días nublados

Podemos ver que durante todos los días nublados la temperatura es bastante más baja, lo cual podíamos deducir debido a las irregularidad de la irradiancia, la cual presenta numerosos picos según los claros y nubes que hay en cada momento del día. Pese a esto vemos que la temperatura en los paneles sigue siendo mayor que la ambiente, pero de forma más discreta que en el caso de los días soleados

Podemos ver que en las gráficas del rendimiento, los valores medios obtenidos son muy similares a los concluidos en los días soleados, pero presentan mayores oscilaciones debido a que las condiciones meteorológicas de medición presentan una alta aleatoriedad. Como se puede observar, nuevamente la tecnología híbrida es la que aporta mejores resultados con valores de rendimiento en torno al 17 %. La tecnología de Silicio Policristalino es la que sigue en cuanto a rendimiento a la tecnología HIT, y presenta rendimientos en torno al 11 % destacando especialmente los días de menores temperaturas, con lo que hemos visto que esta tecnología es muy buena en estos casos. La tecnología de Cadmio Teluro es la que menor rendimiento ha presentado durante todo el proceso, alcanzando valores en torno al 8%.

En cuanto a las gráficas de PR o factor de rendimiento tenemos que tener en cuenta que los fabricantes siempre aconsejan medir el PR en días completamente despejados, para que el valor de valor de la irradiancia sea el mayor posible y un pequeño error en la medición no produzca grandes diferencias en los valores finales. Sin embargo, y a pesar de no ser tan exactos como los obtenidos en días soleados, los valores de PR calculados dan una idea de la tendencia que siguen los paneles y la cual es similar a la anterior. Por tanto los valores del PR durante los días nublados, son muy cercanos a los presentados en los días soleados, y por lo tanto las tecnologías se distribuyen de la misma forma.

6. Presupuesto

A continuación describiremos el presupuesto de la instalación completa de los equipos que hemos utilizado en este proyecto, atendiendo a un precio de mercado para cada equipo, incluyendo materiales adicionales como conexiones (tuercas, latiguillos, tornillería...), precio de proyecto de ingeniería y de obra civil.

Los equipos principales que se han incluido en este presupuesto son los módulos fotovoltaicos con su estructura de sujeción, el inversor, los sensores, los elementos de control y protección y el cableado utilizado para fuerza y para datos.

En cuanto a la Obra civil y el proyecto de ingeniería se ha estimado un valor en función a la potencia instalada y la situación geográfica, considerando en todo momento los precios incluidos de mano de obra de un ingeniero y un técnico electricista.

Como podremos ver más adelante en la Figura 6.1. el precio varía sustancialmente de una tecnología a otra. El precio que más se aleja es el de la tecnología de Cadmio Teluro, que es mucho más barata que las otras dos, como era de prever ya que aunque produce menos energía es más económica. Las otras dos tecnologías son más similares en cuanto a presupuesto aunque la tecnología HIT es la más cara de las tres tecnologías estudiadas, lo que ya suponíamos debido a que es la tecnología más nueva, y de fabricación más elaborada.

A continuación veremos el presupuesto desglosado de la instalación fotovoltaica en estudio:

ELEMENTOS PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA				
Artículo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS				
Panel de Cadmio Teluro. 80 W	10	Ud.	50,40 €	504,00 €
Panel de la tecnología híbrida HIT. 235 W	5	Ud.	738,49 €	3.692,45 €
Panel de Silicio Policristalino. 225 W	5	Ud.	497,25 €	2.486,25 €
INVERSOR				
SMA Sunny Boy 1200	3	Ud.	1.075,00 €	3.225,00 €
SENSORES Y ESTACION DE CONTROL				
SMA Sunny SensorBox	4	Ud.	390,00 €	1.560,00 €
SMA Sunny WebBox	1	Ud.	654,00 €	654,00 €
MEDIDA Y PROTECCION				
Medidor digital de potencia Hager EC051	3	Ud.	182	546,00 €
Interruptor magnetotérmico Schneider Electric K60N-C16	3	Ud.	22,2	66,60 €
Interruptor magnetotérmico Schneider Electric C60N-C25	1	Ud.	50,17	50,17 €
ESTRUCUTRA SOPORTE PARA LOS MÓDULOS				
Estructura soporte para módulo A-170M de dos inclinaciones posibles fabricada por ATERSA con tortillería, canaletas para cables y montaje incluido	20	Ud.	112,5	2.250,00 €
CABLEADO Y CONEXIONES				
Cableado H07V-K Cu. sección = 2x10mm ² (Utilizado para las conexiones entre módulos solares y la caja de conexiones)	40	m	2,23	89,20 €
Cableado H07V-K Cu. sección = 2x95mm ² (Utilizado para las conexiones entre caja de conexión de generador fotovoltaico e inversor)	80	m	9,01	720,80 €
Cableado RS485 (Utilizado para las la transmisión de datos)	40	m	3,24	129,60 €
Cableado RV-K 0,6/1kV Cu. sección=3x35mm ² (Utilizado para las conexiones entre el inversor y la red de baja tensión)	40	m	6,8	272,00 €
Canalización en tubo corrugado de PVC de 32mm de diámetro para llevar el cableado por el exterior.	60	m	1,41	84,60 €
Caja de conexión con IP30 FAMATEL de dimensiones 1.000x550x160 mm.	1	Ud.	48,71	48,71 €
TOTAL EQUIPOS				16.330,67 €
OBRA CIVIL				
Proyecto de la instalación fotovoltaica sobre azotea de edificio (Uc3m)	1	Ud.	7000	7.000,00 €
Obra civil	2,1	kW	300 €/kW	630,00 €
TOTAL INGENIERÍA Y OBRA CIVIL				7.630,00 €
PRECIO TOTAL				23.960,67 €

Fig. 6.1: Tabla de precios con el presupuesto global de la instalación.

7. Conclusiones y recomendaciones

Podemos ver como conclusión final que los tres paneles se alternan en cuanto a alcanzar su máxima temperatura, siempre con valores muy similares, por lo tanto podemos decir que la temperatura no es especialmente elevada en ninguna tecnología. La temperatura es claramente más alta en los días soleados como es lógico al tener una irradiación constante durante todas las horas de luz solar. La producción es menor los días nublados aunque su variación es constante para las tres tecnologías, viéndose más afectadas la tecnología HIT y la de Cadmio Teluro. En cuanto a las gráficas de viento podemos ver que los días que hay valores más altos la temperatura es algo menor, con lo que tener una instalación ventilada es mejor para evitar aumentos indeseados de temperatura.

La tecnología que ha presentado mayores valores tanto de producción como de PR y rendimiento es la tecnología híbrida HIT, pese a tener esta la menor superficie de irradiación, con valores de Performance Ratio que oscilan entre el 80 y el 90%, valores que muestran una muy alta idealidad en este tipo de paneles, superando claramente a las otras dos tecnologías que alcanzan valores bastante más bajos.

Hay que destacar que la tecnología de Silicio Policristalino alcanza valores muy cercanos a la tecnología HIT en condiciones desfavorables de irradiación y temperatura, y al ser más económica se convierte en una tecnología muy interesante para instalaciones con condiciones climatológicas adversas, al tener un precio menor a la tecnología HIT.

La tecnología de Cadmio Teluro ha presentado, como era de esperar los valores más bajos, lo cual era previsible al ser la tecnología más económica, con un precio mucho más bajo que las otras dos tecnologías, lo que la hace una muy buena tecnología para instalaciones aisladas que no precisen mucha energía para abastecerse, aunque una tecnología un poco más deficiente para conexiones a red, ya que proporciona valores menores de potencia que las otras dos.

Como recomendación principal se propone seguir este estudio ampliando el número de tecnologías para así poder abarcar todo el mercado de paneles fotovoltaicos y poder detallar con exactitud que tecnología es mejor en cada situación para así poder tener una herramienta que utilizar en el diseño de una instalación.

De esta forma tendremos una información precisa sobre el efecto de la temperatura y el viento en una instalación determinada, para obtener un rendimiento y una eficiencia en función de la tecnología que queramos instalar o el presupuesto del que se dispone.

También se propone ampliar el estudio variando la situación geográfica así como la inclinación de los paneles, para poder comparar estos datos con los recogidos en este proyecto de manera que verifiquemos las conclusiones que hemos obtenido.

8. Bibliografía

1) Libros y documentos:

- Fernández Salgado, José María. *Guía completa de la energía solar fotovoltaica y termoeléctrica*. [s.l.]. AMV Ediciones, 2008. 302 p. ISBN-13: 978-84-96709-12-6.
- Goswami, D.Yogi; Kreider, Jan F; Kreider, Frank *Principles of solar engineering*. 2a ed. Philadelphia: Taylor & Francis Group, 1999. 688 p. ISBN 1-56032-714-6
- Autor Ventre, Jerry. *Photovoltaic Systems Engineering*. 2a ed. Philadelphia: Taylor & Francis Group, 2004. 455 p. ISBN: 0849317932, 9780849317934
- *Plan de Energías Renovables 2011-2020*. IDAE 2011. Madrid.
- Nelson, Jenny. *The physics of solar cells*. Imperial College Press, 2003. 363 p. ISBN: 1860943497, 9781860943492
- *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*. IDAE. 2011. Madrid.
- Trasancos, José García. *Instalaciones eléctricas en Media y Baja Tensión*. 6ª ed. [Madrid?]: Paraninfo, 2006. 438 p. ISBN: 8428331901, 9788428331906
- *Reglamento electrotécnico de Baja Tensión*. Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Gema Montiel Bustos. "Análisis y comparación de las diferentes tecnologías actuales de las células fotovoltaicas". Director: Salas Merino, Vicente. Proyecto de Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

2) Páginas Web Visitadas:

- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, IDAE. 2013: < www.idae.es >
- SMA Solar Technology Iberica, y de Sunny Portal. 2013:
 - <<http://www.sma-iberica.com/es.html>>
 - <<http://www.sunnyportal.com/Templates/Start.aspx?ReturnUrl=%2f>>
- Photovoltaic Geographical Information System, PVGIS. 2013:
<<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>

3) Apuntes de clase utilizados:

- "Generación eólica y Fotovoltaica". Universidad Carlos III de Madrid, 2012
- "Líneas eléctricas y apartamentas". Universidad Carlos III de Madrid, 2011.

4) Software empleados:

- PVSyst. *PVSyst PHOTOVOLTAIC SOFTWARE*. [CD.]. v:6.o. Demo Disponible en Internet:< <http://www.pvsyst.com/en/> >
- Google. *Google Earth*. v: 7.1.1.1580. Disponible en Internet:
<<http://www.google.es/intl/es/earth/>>
- Microsoft. *Microsoft Office* [CD.]. v:2010.
- Joint Research Centre. *PVGIS. Disponible en Internet:*
<<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>>

Anexo I: Ecuaciones para el cálculo

A continuación vamos a definir los cálculos utilizados durante el proyecto, donde los más relevantes son el rendimiento y el PR (ya que son los valores que mejor definen la idealidad del comportamiento de las diferentes tecnologías), para los cuales tenemos que realizar otra serie de cálculos detallados a continuación:

- Cálculo de la **potencia generada**. La potencia generada se obtiene de la producción o energía vertida por el generador entre las horas efectivas que la ha producido, es decir las horas de sol.

Para ellos definimos:

- Prod._{día}: Producción diaria y se mide en kWh.
- P_{gen}: Potencia generada y se mide en W.

$$P_{\text{gen}}(\text{W}) = \frac{\text{Prod.}_{\text{día}} (\text{kWh})}{\text{Horas de sol (h)}} \cdot 1000$$

Ecuación Anexo 1.1 Cálculo de la potencia generada. Fuente: Asignatura *Generación eólica y fotovoltaica*.

- Cálculo **del porcentaje de producción** del generador en función de la producción.

Para ellos definimos:

- Producc.: Porcentaje de producción de la tecnología en función de la producción total de la instalación.
- Prod._{total}: Producción total diaria de la instalación y se mide en kWh

$$\text{Producc. (\%)} = \frac{\text{Prod.}_{\text{día}} (\text{kWh})}{\text{Prod.}_{\text{total}} (\text{kWh})} \cdot 100$$

Ecuación Anexo 1.2 Cálculo de la producción del generador en función del total de la instalación. Fuente: Asignatura *Generación eólica y fotovoltaica*.

- Cálculo de la **producción normalizada por unidad de superficie** nos proporcionará una idea de cuanta energía es capaz de producir el generador con una superficie de módulo determinada.

Para ellos definimos:

- $Prof_{superf}$: Producción del generador en función de la superficie y se mide en kWh/m^2 .
- S_{gen} : Superficie total de la tecnología y se mide en m^2 .

$$Prod_{superf} \left(\frac{kWh}{m^2} \right) = \frac{Prod_{dia} (kWh)}{S_{gen} (m^2)}$$

Ecuación Anexo 1.3 Cálculo de la potencia generada. Fuente: Asignatura *Generación eólica y fotovoltaica*.

- Cálculo de la **productividad final o "Final Yield" (Yf)** se define como la energía útil producida por un sistema en un cierto periodo de tiempo por unidad de potencia instalada. Este valor nos proporciona la potencia que arroja el sistema en función de la potencia instalada de dicho generador, por lo tanto es un valor normalizado que nos permitirá establecer comparativas.

Para ellos definimos:

- $P_{Instalada_{gen}}$: Potencia instalada de la tecnología y se mide en kWp

$$Y_f = \frac{Prod. (kWh)}{P_{Instalada_{gen}} (kWp)} / día$$

Ecuación Anexo 1.4 Cálculo de la productividad final o "Final Yield". Fuente: Asignatura *Generación eólica y fotovoltaica*.

- El rendimiento del generador fotovoltaico es la relación entre la potencia que obtenemos de la célula y la potencia de la luz que incide sobre ella.

Para ellos definimos:

- G : Irradiancia media durante las horas de sol y se mide en W/m^2 .

$$\eta(\%) = \frac{P_{gen}(W)}{S_{gen}(m^2) \cdot G} \cdot 100$$

Ecuación Anexo 1.5 Cálculo del rendimiento del generador. Fuente: Asignatura *Generación eólica y fotovoltaica*.

- Cálculo del **PR o performance Ratio** es un porcentaje, por lo que sus valores oscilarán entre 0 y 100, y cuanto más cerca estén de este último valor, indicarán una mayor idealidad en el comportamiento del generador. Es decir, un PR de 100 querría decir que ese generador ha producido una potencia igual a la máxima posible bajo esas condiciones de irradiancia, que corresponderían con las ideales. Como esto no es posible, el valor siempre será menor que 100, considerándose aceptables los calculados por encima de 70.

Para ellos definimos:

- P_{\max} : Potencia durante las horas de sol.
- $P_{\text{horas sol}}$: Potencia instalada en el generador.
- G : Irradiancia media durante las horas de sol y se mide en W/m^2 .

$$PR(\%) = \frac{\frac{P_{\max}}{P_{\text{horas sol}}}}{\frac{G}{1000}} \cdot 100$$

Ecuación Anexo 1.6 Cálculo del factor de rendimiento o "Performance Ratio". Fuente: Asignatura *Generación eólica y fotovoltaica*.

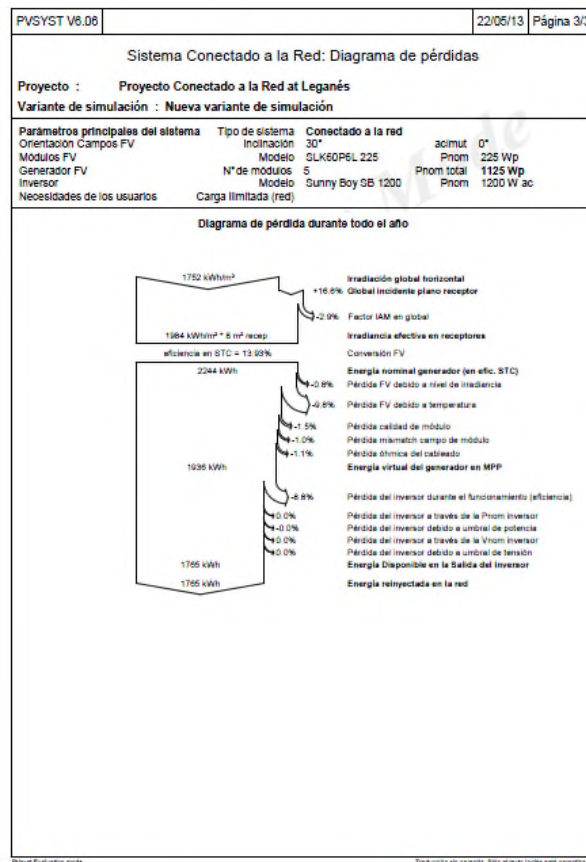
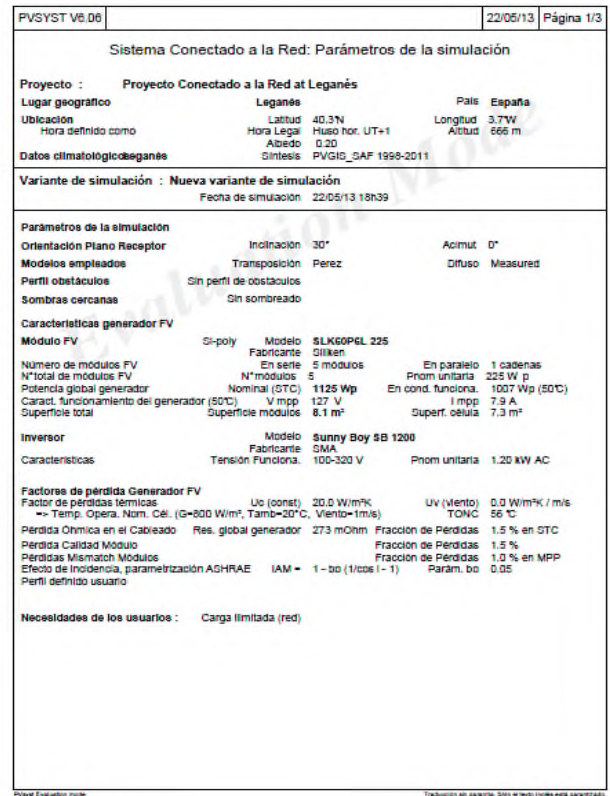
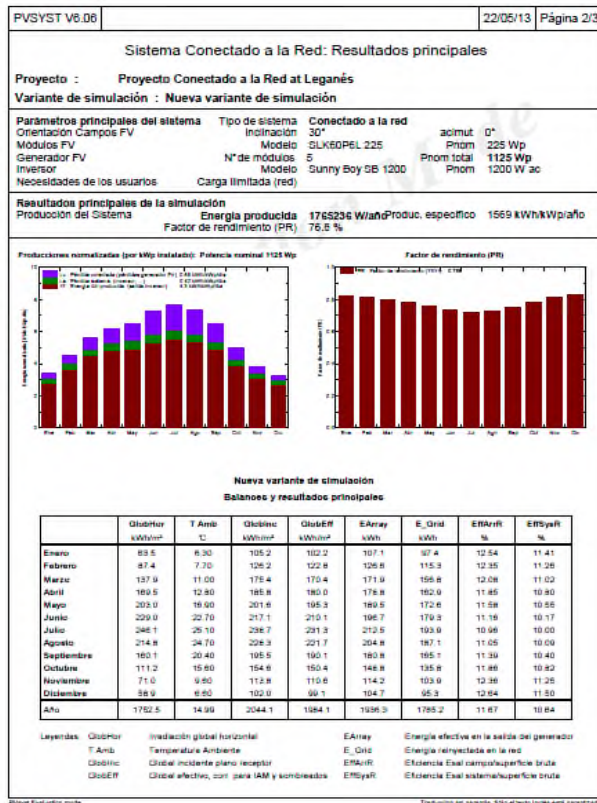


Fig.2 Anexo II: Informe del panel de Si-P. Fuente: PVSyst.

Player Evaluation code

Project Evaluation exists

Please Evaluate me

“Trabajo de Fin de Grado” Universidad Carlos III de Madrid